

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“COMPORTAMIENTO DEL AISLAMIENTO SÍSMICO
ELASTOMÉRICO EN LA BASE Y SU INTERACCION CON LA
ESTRUCTURA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

ROY ERICKSEN REYNA SALAZAR

ASESOR

Dr. CARLOS ALBERTO ZAVALA TOLEDO

LIMA – PERÚ

2019

© 2019, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir de la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Reyna Salazar, Roy Ericksen

rreynas@uni.edu.pe / royanyer@gmail.com

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres Baldomero y Elizabeth por el empuje y la confianza que siempre me mostraron; y a mi querido hermano Josué por ser un gran impulso para seguir adelante. Espero que este logro los llene de felicidad tanto como a mí.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi asesor, el Dr. Carlos Zavala, por la guía y confianza durante la realización de la presente investigación. A mis colegas del Laboratorio de Estructuras, por su apoyo y por los buenos momentos que pasamos juntos. Un agradecimiento al Laboratorio de Estructuras del Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID y a su equipo técnico por el apoyo durante la realización de los ensayos de laboratorio.

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
PRÓLOGO	6
LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	11
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	15
1.2 GENERALIDADES.....	15
1.3 PROBLEMÁTICA	16
1.4 OBJETIVOS	16
1.4.1 Objetivo General.....	16
1.4.2 Objetivos Específicos	16
1.5 HIPÓTESIS	17
1.6 ESTADO DEL ARTE DEL AISLAMIENTO SÍSMICO EN EL MUNDO.....	17
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	26
2.1 MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DEL AISLAMIENTO SÍSMICO	26
2.2 TIPOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO	28
2.2.1 Aislamiento de Caucho Natural de Bajo Amortiguamiento (NRB) ..	29
2.2.2 Aislamiento de Caucho Natural con Núcleo de Plomo (LRB)	29
2.2.3 Aislamiento de Caucho de Alto Amortiguamiento (HRB)	30
2.3 ¿PORQUE USAR EL AISLAMIENTO SÍSMICO?	31
2.3.1 Ventajas de usar el Aislamiento Sísmico	33
2.3.2 Desventajas de usar el Aislamiento Sísmico.....	33
CAPÍTULO III: ANÁLISIS NUMÉRICO	34
3.1 DEL ANÁLISIS NUMÉRICO	34
3.2 SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD	34
3.3 INTERACCIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO CON LA ESTRUCTURA.....	35
3.4 PARÁMETROS DEL COMPORTAMIENTO DEL AISLADOR	39
3.4.1 Compresión	39

3.4.2	Corte	42
3.4.3	Flexión	43
3.4.4	Pandeo	45
3.4.5	Estabilidad	47
3.5	MODELO BILINEAL FUERZA-DESPLAZAMIENTO	49
CAPÍTULO IV: PARTE EXPERIMENTAL		51
4.1	ENSAYO DE MODULO DE CORTE	51
4.1.1	Objetivo	51
4.1.2	Especímenes	51
4.1.3	Procedimiento de Ensayo y Patrón de Deformaciones	53
4.1.4	Sistema de Adquisición de Datos	53
4.1.5	Resultados Experimentales	55
4.1.6	Procesamiento de Datos Experimentales	57
4.2	ENSAYO DINÁMICO SOBRE UNA MESA VIBRADORA	59
4.2.1	Objetivo	59
4.2.2	Especímenes	59
4.2.3	Procedimiento de Ensayo	61
4.2.4	Sistema de Adquisición de Datos	61
4.2.5	Resultados Experimentales	62
4.2.6	Procesamiento de Datos Experimentales	64
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES		69
5.1	MÓDULO DE CORTE DE CAUCHO	69
5.1.1	Procedimiento de Cálculo según ASTM D-4014	69
5.1.2	Módulo de Corte Experimental	70
5.1.3	Amortiguamiento Equivalente Experimental	73
5.2	PERIODO Y MODOS DE VIBRACIÓN	74
5.3	HISTÉRESIS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO	76
5.4	COMPARACIÓN CON EL MODELO BILINEAL	79
CAPÍTULO VI: PROPUESTA PARA EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO		81
6.1	METODOLOGÍA DE DISEÑO	81
6.2	PARÁMETROS DE DISEÑO	82
6.2.1	Espectro de Diseño	83
6.2.2	Factor de Amortiguamiento	83

6.2.3	Fuerza Cortante.....	84
6.2.4	Desplazamiento de Diseño.....	84
6.2.5	Máximo Desplazamiento de Diseño	86
6.2.6	Otras Consideraciones	87
6.3	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO CON NUCLEO DE PLOMO	87
6.3.1	Paso 1: Diseño objetivo	89
6.3.2	Paso 2: Rigidez objetiva	89
6.3.3	Paso 3: Selección de las propiedades del caucho	89
6.3.4	Paso 4: Dimensiones del núcleo de plomo	90
6.3.5	Paso 5: Dimensiones del caucho	90
6.3.6	Paso 6: Verificaciones	92
6.4	EJEMPLO APLICATIVO DE DISEÑO	93
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA	100
	ANEXO A: ENSAYO DE MÓDULO DE CORTE	103
	ANEXO B: ENSAYO SOBRE MESA VIBRADORA.....	106

RESUMEN

De acuerdo a la filosofía de diseño sísmico de edificaciones, las edificaciones deben ser diseñadas para salvaguardar la vida de sus ocupantes. Sin embargo, en edificaciones cuyo servicio es vital en caso de emergencias, tal como establecimientos de salud, así como también edificaciones que puedan servir de refugio y albergue, debe asegurarse que estas edificaciones continúen operativas y funcionales después del desastre. Por esta razón es necesario proteger sísmicamente las estructuras. Para llevar a cabo la protección sísmica de estructuras, diversas tecnologías han sido desarrolladas e implementadas en el mundo, una de ellas es el aislamiento sísmico de estructuras.

El objetivo principal de la presente investigación se enfoca en el estudio del comportamiento del aislamiento sísmico elastomérico y su interacción con la estructura. Para llevar a cabo esto, se plantea estudiar experimentalmente el módulo de corte del caucho y verificar la efectividad del sistema de aislamiento mediante un ensayo sobre mesa vibradora.

De los resultados experimentales, se verificó la dependencia del módulo de corte del caucho con respecto de la deformación de corte. Asimismo, se verificó la efectividad del sistema de aislamiento sobre un modelo sometido bajo diversos niveles de frecuencias de vibración, obteniendo un incremento del periodo natural de vibración y nivel de amortiguamiento respecto del modelo con base fija. Por otro lado, el modelo bilineal propuesto, ajusta los lazos histeréticos experimentales, con un error menor al 10%.

Finalmente, se propone una metodología de diseño de un sistema de aislamiento sísmico para edificaciones basado en las recomendaciones del Consejo Internacional para la Investigación e Innovación en Edificaciones y Construcción usando el procedimiento de diseño preliminar CW2012 y, además, tomando en consideración la Norma de Diseño Sismorresistente NTE E.030-2018.

Palabras Clave: *Aislamiento sísmico, módulo de corte, mesa vibradora, modelo bilineal, método lineal equivalente.*

ABSTRACT

According to the philosophy of seismic design of buildings, buildings must be design to keep the life of the inhabitants safe. However, the seismic design of essential buildings such as health centers, as well as buildings that could be used as shelters in case of disaster, must ensure that those buildings remain operational and functional post disaster. For this reason, it is necessary to protect seismically the structure. To do so, many technologies have been developed and implemented throughout the world, one of them is the seismic isolation system of structures.

The aim of this research is to study the behavior of seismic isolation system and its interaction with the structure. To accomplish this, it is proposed to study experimentally the shear modulus of rubber and to verify the effectiveness of the seismic isolation system through a shaking table test.

From the experimental results, dependency of shear modulus of rubber respect to the shear strain deformation was verified. Moreover, the effectiveness of seismic isolation system was verified on a model subjected to different levels of vibration frequencies, obtaining an increment in the vibration natural period and damping respect to the fix base model. On the other hand, the proposed bilinear model, gave a good match with respect to the experimental hysteretic curves with an error less than 10%.

Finally, a proposal for a design procedure of base isolated buildings in Peru is presented in this study. This procedure is based on the recommendation of CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction), using the preliminary design procedure for seismically isolated buildings (CW2012) and taking into consideration the Peruvian seismic code NTE E.030-2018.

Keywords: *Seismic isolation, shear modulus, shaking table, bilinear model, linear equivalent method.*

PRÓLOGO

El desarrollo de los sistemas de protección sísmica para la realidad peruana, se encuentra en una etapa de desarrollo, donde la normatividad actual solo contempla el uso de sistemas foráneos y desarrollos de estudios que en muchos casos no permiten el desarrollo de los profesionales locales, ni la mejora de sus capacidades, ya que los diseños son enviados a desarrollarse al exterior y luego son avalados por profesionales que desconocen de estas técnicas. Es por esta razón que el presente estudio abre la posibilidad para el desarrollo de tecnologías locales, donde el material es un principal actor, así como la mejora del conocimiento de profesionales y técnicos peruanos, ha permitido la generación de prototipos que pretenden demostrar que es posible desarrollar estas tecnologías en el Perú. La tesis de Roy Reyna marca un hito en lo que será la historia de los sistemas de protección sísmica en el Perú, con un producto nacional y que nos enorgullece se haya desarrollado en la FIC-UNI.

Dr. Ing. Carlos Zavala
Profesor CISMID-FIC-UNI

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 4.1 Dispositivos de adquisición de datos.....	54
Tabla N° 4.2 Deformación máxima del espécimen y de lámina de caucho	55
Tabla N° 4.3 Carga máxima y desplazamiento máximo experimental	57
Tabla N° 4.4 Dispositivos de adquisición de datos.....	62
Tabla N° 4.5 Resultados procesados para espécimen con base fija	64
Tabla N° 4.6 Resultados procesados para espécimen con base fija	65
Tabla N° 4.7 Resultados procesados para espécimen con base aislada	66
Tabla N° 4.8 Resultados procesados para espécimen con base aislada	67
Tabla N° 4.9 Comparación de parámetros dinámicos.....	68
Tabla N° 5.1 Peso y rigidez del espécimen	75
Tabla N° 5.2 Periodos teóricos.....	76
Tabla N° 5.3 Rigidez y amortiguamiento equivalentes.....	78
Tabla N° 5.4 Parámetros del modelo bilineal	79
Tabla N° 6.1 Limitaciones del método lineal equivalente	82

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1 Cinturón del fuego del Pacífico	15
Figura N° 1.2 Primer sistema de aislamiento en el mundo	18
Figura N° 1.3 Edificio gubernamental de la ciudad de Hachinohe	19
Figura N° 1.4 Sistema de aislamiento con núcleo de plomo	19
Figura N° 1.5 Foothill Communities Law and Justice Center, EE.UU.	20
Figura N° 1.6 Edificio municipal de la ciudad de Tsukuba, Japón	21
Figura N° 1.7 Sistema de aislamiento mixto	21
Figura N° 1.8 Elementos de amortiguamiento	22
Figura N° 1.9 Hospital General de Ojiya reforzado con aislamiento sísmico	23
Figura N° 1.10 Hospital reforzado con aislamiento sísmico	23
Figura N° 1.11 Edificio reforzado del GSI, Japón.....	24
Figura N° 1.12 Edificio del Parlamento de Nueva Zelanda	25
Figura N° 1.13 Compañía Nacional de Tefonía de Italia	25
Figura N° 2.1 Mecanismo de funcionamiento del aislamiento sísmico	27
Figura N° 2.2 Natural Rubber Bearing (NRB)	29
Figura N° 2.3 Curva de histéresis – NRB	29
Figura N° 2.4 Lead-plug Rubber Bearing (LRB).....	30
Figura N° 2.5 Curva de histéresis LRB	30
Figura N° 2.6 High Damping Rubber Bearing (HRB)	30
Figura N° 2.7 Curva de histéresis HRB	30
Figura N° 2.8 Espectro de respuesta de aceleración máxima.	32
Figura N° 2.9 Espectro de respuesta de desplazamiento máxima.....	32
Figura N° 3.1 Modelo de un grado de libertad	34
Figura N° 3.2 Estructura de un nivel con aislamiento sísmico	35
Figura N° 3.3 Modos de vibración	36
Figura N° 3.4 Modelo de múltiples grados de libertad	37
Figura N° 3.5 Equilibrio dinámico de un modelo de N grados de libertad.....	37
Figura N° 3.6 Aislador bajo compresión	40
Figura N° 3.7 Tendencia del módulo de compresión	41
Figura N° 3.8 Esfuerzo cortante debido a compresión.....	42
Figura N° 3.9 Aislador bajo flexión	43
Figura N° 3.10 Aislador bajo carga axial y flexión	45
Figura N° 3.11 Aislador bajo carga axial y flexión	48
Figura N° 3.12 Area reducida normalizada vs traslape	48

Figura N° 3.13 Modelo bilineal elasto-plástico	49
Figura N° 3.14 Patrón de desplazamiento	50
Figura N° 3.15 Histéresis usando un modelo bilineal.....	50
Figura N° 4.1 Vista tridimensional del espécimen	51
Figura N° 4.2 Placa superior e inferior	52
Figura N° 4.3 Placa intermedia	52
Figura N° 4.4 Patrón de deformaciones	53
Figura N° 4.5 Sistema de adquisición de datos	54
Figura N° 4.6 Espécimen sujeto a diferentes niveles de deformación de corte ..	55
Figura N° 4.7 Patrón de deformación experimental	56
Figura N° 4.8 Fuerza vs. Desplazamiento experimental	56
Figura N° 4.9 Data original y Data procesada.....	57
Figura N° 4.10 Curvas procesadas Fuerza vs. Desplazamiento.....	58
Figura N° 4.11 Espécimen de tres pisos a escala 1/10 con base fija.....	59
Figura N° 4.12 Espécimen de tres pisos a escala 1/10 con base aislada.....	60
Figura N° 4.13 Detalles del espécimen de tres pisos y sistema de aislamiento .	60
Figura N° 4.14 Sistema de adquisición de datos	61
Figura N° 4.15 Registro de aceleración y desplazamiento con base fija	63
Figura N° 4.16 Registro de aceleración y desplazamiento con base aislada.....	63
Figura N° 4.17 Vibración forzada de espécimen con base fija.....	64
Figura N° 4.18 Vibración forzada de espécimen con base aislada	65
Figura N° 5.1 Módulo de corte de acuerdo a ASTM D-4014.....	69
Figura N° 5.2 Módulo de corte al 25% de la deformación	70
Figura N° 5.3 Módulo de corte vs. Deformación de corte.....	71
Figura N° 5.4 Tendencia de la degradación del módulo de corte promedio	72
Figura N° 5.5 Tendencia de la degradación del módulo de corte promedio	72
Figura N° 5.6 Amortiguamiento efectivo por ciclo de cada espécimen	73
Figura N° 5.7 Amortiguamiento efectivo vs Deformación de corte.....	74
Figura N° 5.8 Modelo 3D con base fija y con base aislada	75
Figura N° 5.9 Modos normalizados	76
Figura N° 5.10 Fuerza cortante vs desplazamiento	77
Figura N° 5.11 Rigidez lateral equivalente vs desplazamiento	78
Figura N° 5.12 Amortiguamiento equivalente vs desplazamiento	78
Figura N° 5.13 Comparación con el modelo bilineal	80
Figura N° 6.1 Diagrama de flujo para una edificación aislada	81

Figura N° 6.2 Diagrama de flujo para la convergencia del ELM	85
Figura N° 6.3 Convergencia del ELM	86
Figura N° 6.4 Procedimiento de un Sistema de Aislamiento en la Base.....	88
Figura N° 6.5 Límites de esfuerzo de corte	93
Figura N° A.1 Matriz para la fabricación de especímenes.	103
Figura N° A.2 Láminas de acero arenadas.	103
Figura N° A.3 Matriz ensamblada.....	103
Figura N° A.4 Prensa vulcanizadora.	103
Figura N° A.5 Espécimen durante proceso de vulcanizado.	103
Figura N° A.6 Desmontaje del espécimen.....	103
Figura N° A.7 Espécimen despues del vulcanizado.....	104
Figura N° A.8 Vista de pervil del espécimen vulcanizado.	104
Figura N° A.9 Espécimen a ser ensayado.....	104
Figura N° A.10 Laminas de caucho vucanizadas.....	104
Figura N° A.11 Ensayo de módulo de corte MC-01.	104
Figura N° A.12 Espécimen MC-01 despues del ensayo.	104
Figura N° A.13 Ensayo de módulo de corte MC-02.	105
Figura N° A.14 Espécimen MC-02 durante el ensayo.....	105
Figura N° A.15 Ensayo de módulo de corte MC-03.	105
Figura N° A.16 Espécimen MC-03 durante el ensayo.....	105
Figura N° B.1 Ensayo dinámico sobre mesa vibradora.....	106
Figura N° B.2 Calibración de mesa vibradora con aprox. 120 kgf.....	106
Figura N° B.3 Calibración de mesa vibradora con aprox. 240 kgf.....	106
Figura N° B.4 Calibración de mesa vibradora con aprox. 360 kgf.....	106
Figura N° B.5 Sistema de fijación del sistema de aislamiento.	106
Figura N° B.6 Vista lateral del sistema de aislamiento.....	106
Figura N° B.7 Espécimen con base fija.	107
Figura N° B.8 Espécimen con base fija.	107
Figura N° B.9 Espécimen con base aislada.	107
Figura N° B.10 Espécimen con base aislada.	107
Figura N° B.11 Transductores de desplazamiento laser.....	108
Figura N° B.12 Transductores de aceleracion.....	108
Figura N° B.13 Vista general durante el ensayo.	108
Figura N° B.14 Programa para la adquisición de datos.	108

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

A_{ST}, A_{1F}, A_{3F}	: Amplitud de movimiento de la mesa vibradora, primer nivel y tercer nivel.
A_r, A_p, A'	: Área del caucho, área del núcleo de plomo y área reducida.
a_0, a_1	: Factores de amortiguamiento modal de Rayleigh.
a	: Dimensión del lado de una sección cuadrada de aislador.
$[C]$: Matriz de amortiguamiento.
C	: Factor de Amplificación Sísmico.
c, c_s, c_b, c_i	: Coeficiente de amortiguamiento, coeficiente de amortiguamiento de la superestructura, coeficiente de amortiguamiento del sistema de aislamiento y coeficiente de amortiguamiento del nivel i.
d	: Traslape longitudinal de aislador bajo deformación lateral.
D_{max}	: Deformación máxima.
D_y	: Deformación de fluencia.
D_0, D_p	: Diámetro externo del aislador y diámetro del núcleo de plomo.
D_{crit}	: Desplazamiento crítico.
E, E_0	: Módulo de elasticidad.
E_c	: Módulo de compresibilidad instantáneo del compuesto caucho-acero.
E_∞	: Módulo de vulcanizado del caucho.
F_y	: Fuerza de fluencia.
F_h	: Factor de amortiguamiento del sistema de aislamiento.
FS	: Factor de seguridad.
f, f_1, f_3	: Frecuencia natural, frecuencia natural del primer y tercer nivel.
g	: Aceleración de la gravedad.
$G_{25\%}, G_0$: Módulo de corte a un 25% de deformación de corte.
G, G_r, G_p	: Módulo de corte, módulo de corte del caucho y módulo de corte del núcleo de plomo.
H, H_r	: Altura total del aislador (caucho y acero) y espesor total del caucho.
H_i	: Altura de entrepiso del i-ésimo piso.
h_s, h_b	: Factor de amortiguamiento de la superestructura y factor de amortiguamiento del sistema de aislamiento.
h, h_{eq}	: Amortiguamiento y amortiguamiento equivalente.

I	: Momento de inercia.
$[K]$: Matriz de rigidez.
K, K_1, K_2, K_{eq}	: Rigidez, rigidez inicial del aislador, rigidez post-fluencia del aislador y rigidez equivalente del aislador.
K_r, K_p	: Rigidez del caucho y rigidez del núcleo de plomo.
K_H	: Rigidez lateral de aislador.
K_V	: Rigidez vertical del aislador.
k, k_s, k_b, k_i	: Rigidez lateral, rigidez lateral de la superestructura, rigidez lateral del sistema de aislamiento y rigidez lateral del nivel i .
$[M]$: Matriz de masas.
m, m_s, m_b, m_i	: Masa concentrada, masa concentrada de la superestructura, masa concentrada en la base y masa concentrada del nivel i .
M	: Momento flector actuante sobre el aislador.
M_T, M_i	: Masa total de la superestructura y masa en el i -ésimo piso.
n	: Número de capas de la lámina de caucho.
P	: Carga axial actuante sobre el aislador.
P_E	: Fuerza de pandeo de Euler.
P_S	: Rigidez de corte por pandeo del aislador.
P_{crit}	: Carga crítica de pandeo sobre el aislador.
Q	: Resistencia característica de un lazo histerético.
Q_s, Q_i	: Fuerza cortante de sistema de aislamiento y fuerza cortante de i -ésimo piso de la superestructura.
R	: Radio de una sección de aislador circular. Coeficiente de Reducción Sísmica.
$\{r\}$: Vector unitario.
r	: Radio de giro de la sección.
S	: Factor de Amplificación del Suelo.
S_a	: Aceleración espectral.
S_1, S_2	: Factor de forma primario y secundario.
T	: Periodo de vibración natural.
t_r, t_s	: Espesor de la lámina de caucho y lámina de acero.
U	: Factor de uso o importancia.
u	: Ductilidad del sistema estructural.
$u_{(t)}, \dot{u}_{(t)}, \ddot{u}_{(t)}$: Desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta de la estructura.

$u_g(t), \dot{u}_g(t), \ddot{u}_g(t)$: Desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta del suelo.
$v(t), \dot{v}(t), \ddot{v}(t)$: Desplazamiento, velocidad y aceleración relativa de la estructura.
W	: Peso total soportado por el aislador.
W_D	: Energía disipada pro ciclo del lazo histerético.
$\{x\}$: Vector desplazamiento.
$x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$: Desplazamiento, velocidad y aceleración relativa.
x, x_s, x_b, x_i	: Desplazamiento relativo, desplazamiento relativo de la superestructura, desplazamiento relativo del sistema de aislamiento y desplazamiento relativo del nivel i.
X_{max}	: Deformación maxima del lazo histerético.
X_d	: Desplazamiento del sistema de aislamiento correspondiente al 100% de la deformación de corte del caucho.
Z	: Factor de zona.
α	: Ángulo relativo formado entre la plancha de acero superior e inferior en un estado deformado.
β	: Factor de relación entre la rigidez inicial y la rigidez post-fluencia.
$\gamma, \gamma_c, \gamma_{prom}$: Deformación unitaria de corte, deformación unitaria de corte del caucho producido por una carga de compresión y deformacion unitaria de corte promedio.
γ_1, γ_2	: Deformación unitaria de corte bajo el sismo de Nivel 1 y nivel 2.
γ_b, γ_{bprom}	: Deformación unitaria de corte y deformación de corte promedio producido por la acción de la flexión sobre el aislador.
γ_α	: Factor de seguridad para un sismo Nivel 2.
γ_t	: Factor de seguridad relacionado a la excentricidad del sistema de aislamiento.
γ_e	: Factor de seguridad relacionado a la variación de las propiedades debido al cambio de temperatura, envejecimiento o tolerancias en las dimensiones.
Δ	: Deformación vertical bajo carga de compresión.
δ	: Desplazamiento de diseño del sistema de aislamiento.
δ_{max}	: Máximo desplazamiento de diseño bajo un sismo Nivel 2.
δ_{gap}	: Máximo desplazamiento de diseño usado para determinar la separación del sistema de aislamiento y especificaciones de ensayo para el sistema de aislamiento.

$\varepsilon, \varepsilon_c$: Deformación unitaria y deformación unitaria del caucho bajo carga de compresión.
ϵ	: Relación de frecuencias naturales de vibración.
η	: Relación de masa de la superestructura respecto de la masa total.
ρ	: Radio de curvatura.
ρ_1, ρ_3	: Razón de amplitud de movimiento del primer y tercer nivel, respecto del movimiento de la mesa vibradora.
ρ_{max}	: Razón de amplitud de movimiento máxima.
σ	: Esfuerzo sobre la lamina de caucho.
σ_p	: Esfuerzo de fluencia para el núcleo de plomo.
σ_{max}	: Esfuerzo máximo en compresion sobre la lámina de caucho.
σ_{cr}	: Esfuerzo crítico de corte.
τ, τ_{max}	: Esfuerzo de corte y esfuerzo máximo de corte en la interfaz caucho-acero.
ϕ_1, ϕ_2	: Primera y segunda forma de modo de vibración.
ψ	: Relación entre radio interno y radio externo del aislador.
ω_s, ω_b	: Frecuencia circular de vibración de la superestructura y frecuencia natural de vibración del sistema de aislamiento.
ω_H	: Frecuencia de vibración horizontal.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.2 GENERALIDADES

Las pérdidas socioeconómicas producidas por los desastres ocurren en cualquier parte del mundo, especialmente en países con una alta exposición de la población y de su infraestructura, sumado al peligro de ocurrencia de dichos desastres naturales y a la alta vulnerabilidad de los mismos. En este sentido, Perú es uno de los países más afectados por los desastres, tales como: sismos, tsunamis, inundaciones, entre otros. Adicionalmente al alto riesgo de ocurrencia de desastres naturales, los países en vías de desarrollo incluido Perú, sufren fuertemente a causa de los daños generados por los desastres debido a las deficientes medidas de prevención y mitigación de desastres, sumado a una falta de personal técnico especializado en las oficinas gubernamentales encargadas de la toma de decisiones.

Como es sabido, Perú se encuentra ubicado en el llamado “Cinturón del Fuego del Pacífico o Ring of Fire en inglés” (ver Figura N° 1.1), el cual define el área con más alta actividad sísmica en el mundo. Esta área incluye algunos países como Japón, Estados Unidos, México, Chile y Perú entre otros, que son afectados principalmente por terremotos y sus réplicas, así como también tsunamis. En el caso de Perú, los terremotos son generados principalmente por una brusca liberación de energía, el cual es debido a un movimiento de subducción entre la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca. Adicionalmente a este mecanismo de subducción, también hay sismos generados por fallas geológicas y vulcanismo.



Figura N° 1.1 Cinturón del fuego del Pacífico
(Fuente: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/ring-fire/>)

Debido al riesgo existente frente a la ocurrencia de terremotos de gran magnitud en la costa peruana, las técnicas de reforzamiento y protección sísmica de edificios debe ser implementado.

1.3 PROBLEMÁTICA

Debido a que el Perú se encuentra ubicado en un área con alta actividad sísmica, conformado por una confluencia de placas tectónicas, la placa Sudamericana y la placa de Nazca; sumado a esto, la gran informalidad en la construcción sobre todo en los lugares de menos recursos económicos en la población, la falta de asesoramiento técnico y de planificación de crecimiento de las ciudades; todo en conjunto conlleva a tener una alta peligrosidad sísmica.

De acuerdo a la filosofía de diseño sísmico de edificaciones, las edificaciones deben ser diseñadas para salvaguardar la vida de sus ocupantes. Sin embargo, en edificaciones cuyo servicio es vital en caso de emergencias, tal como establecimientos de salud, hospitales y clínicas, así como también edificaciones que puedan servir de refugio y albergue, debe asegurarse que estas edificaciones continúen operativas y funcionales después del desastre.

Para llevar a cabo la protección sísmica de estructuras, diversas tecnologías han sido desarrolladas e implementadas en el mundo, una de ellas es el aislamiento sísmico de estructuras. El aislamiento sísmico, es relativamente nuevo en el Perú, motivo por el cual, el estudio y difusión de esta tecnología, es necesario para su adecuado uso y aplicación en la construcción de edificaciones.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento de un sistema de aislamiento de caucho basado en experimentación y proponer un modelo analítico para predecir su comportamiento.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar experimentalmente el módulo de corte del caucho y estudiar la relación entre el módulo de corte y el nivel de deformación de corte.

- Estudiar la efectividad del sistema de aislamiento mediante un ensayo dinámico sobre mesa vibradora.
- Proponer un modelo esfuerzo-deformación calibrado experimentalmente para determinar el comportamiento el sistema de aislamiento.
- Proponer una metodología de diseño de un sistema de aislamiento sísmico para edificaciones.

1.5 HIPÓTESIS

La hipótesis básica para el análisis de una edificación con aislamiento sísmico es considerar que la estructura se comporta como un cuerpo rígido el cual se apoya sobre un sistema de aislamiento, experimentando tres grados de libertad, dos traslacionales y uno rotacional. Sin embargo, las estructuras experimentan deformaciones debido a la dinámica de movimiento, por lo que el objetivo principal del sistema de aislamiento sísmico es reducir las deformaciones y por ende los daños producidos en la estructura.

1.6 ESTADO DEL ARTE DEL AISLAMIENTO SÍSMICO EN EL MUNDO

Los sistemas de control de respuesta sísmica, así como también las técnicas de refuerzo han sido desarrollados e implementados en edificios de todo el mundo, tales como: Japón, Italia, Estados Unidos, Nueva Zelanda, entre otros; con el objetivo de reducir los daños y pérdidas económicas, además de salvaguardar las vidas de los habitantes. Un ejemplo de esto ocurrió en los terremotos de Northridge, USA (1994) y Kobe, Japón (1995), donde se pudo observar el excelente comportamiento de estructuras sísmicamente aisladas frente a otras estructuras convencionales.

El 11 de marzo del 2011, ocurrió un sismo de gran magnitud (Mw 9.0) que azotó el este de Japón, el cual causó muchas pérdidas económicas y de vidas humanas; sin embargo, los edificios de base aislada con los que cuenta Japón no presentaron daños estructurales, además no se reportaron daños en los elementos no estructurales, así como también los equipamientos dentro de los edificios con aislamiento basal.

La escuela primaria “J. H. Pestalozzi” en Skopje, República de Macedonia, fue construida en 1969 y es el primer edificio en el mundo en el que se usaron

aisladores de caucho natural para proteger la estructura frente a terremotos (ver Figura N° 1.2). El colegio fue donado por el Gobierno de Suiza luego del terremoto catastrófico ocurrido el 26 de julio de 1963 [10][11]. El edificio tiene tres pisos y está construido a base de concreto armado, el cual se apoya sobre aisladores de caucho sin ningún refuerzo por lo que no tiene una alta rigidez vertical en comparación con su rigidez lateral, causando abultamientos laterales producto de la carga de soporte. Actualmente los aisladores de caucho poseen un refuerzo de láminas de acero el cual provee una mayor rigidez vertical para soportar la carga de la edificación.



Figura N° 1.2 Primer sistema de aislamiento en el mundo
(Fuente: Garevski y Kelly, 1998)

Principalmente existen dos tipos de aislamiento sísmico, el aislamiento sísmico elastomérico y el aislamiento sísmico deslizante. En la actualidad, el aislamiento sísmico elastomérico es fabricado a base de múltiples capas de caucho reforzadas con láminas de acero, proveyendo al aislador una alta rigidez vertical y una adecuada rigidez horizontal que permite desacoplar el movimiento sísmico de la estructura [14].

Entre los tipos de aislamiento sísmico elastomérico se encuentran principalmente el aislamiento sísmico de caucho natural, el aislamiento sísmico de caucho con núcleo de plomo y el aislamiento sísmico de caucho de alto amortiguamiento; siendo el aislamiento sísmico de caucho con núcleo de plomo uno de los sistemas de aislamiento sísmico elastomérico más usados en el mundo, debido al nivel de amortiguamiento que proporciona el núcleo de plomo, el cual disipa la energía de entrada del sismo y de esta manera reduce la respuesta de la estructura y por consiguiente reduciendo el daño y protegiendo tanto la vida de sus ocupantes así como el contenido de la edificación.

Un ejemplo de este sistema, es el antiguo edificio gubernamental de la ciudad de Hachinohe, ubicado en la Prefectura de Aomori, Japón, a 292km de distancia del epicentro del sismo de Tohoku en el año 2011 (ver Figura N° 1.3). El edificio tiene una estructura de perfiles de acero con concreto reforzado, 10 pisos de altura sobre el sistema de aislamiento en la base y un piso técnico en el nivel de aislamiento, el cual está compuesto por aisladores con núcleo de plomo. [22]

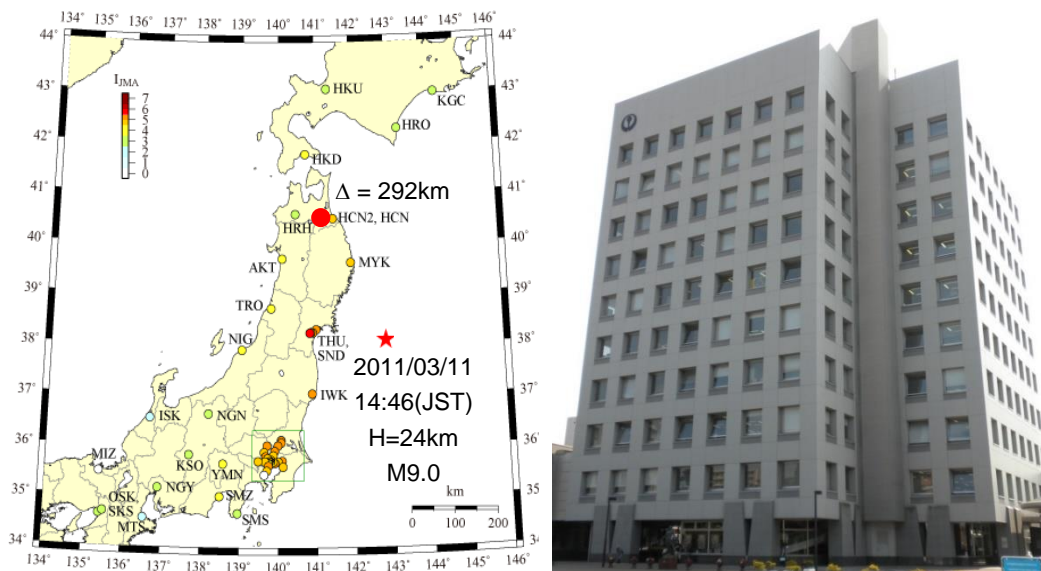


Figura N° 1.3 Edificio gubernamental de la ciudad de Hachinohe
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

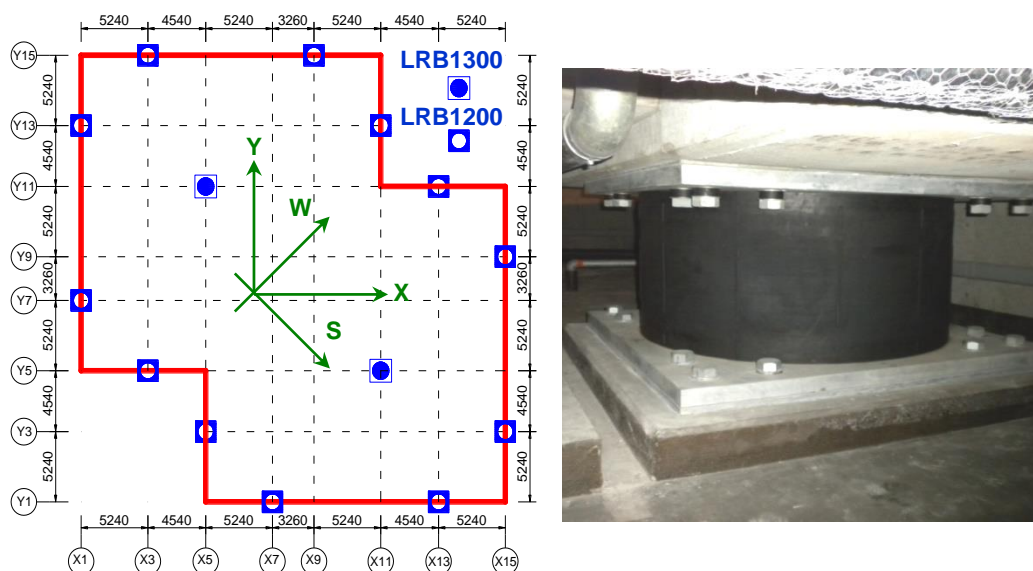


Figura N° 1.4 Sistema de aislamiento con núcleo de plomo
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

El sistema de aislamiento usado en esta edificación cuenta en total, con 14 aisladores de caucho con núcleo de plomo (12 aisladores de 1200mm y 2 aisladores de 1300mm de diámetro) cuya distribución en planta se aprecia en la Figura N° 1.4 [22]. Esta edificación no presentó daños significativos debido al sismo de Tohoku en el año 2011 y continuó operando después de ocurrido el evento sísmico, demostrando así la efectividad del sistema de aislamiento.

En 1984 inició la construcción del primer edificio aislado construido en Estados Unidos, la construcción terminó en 1985; el Foothill Communities Law and Justice Center (ver Figura N° 1.5), un centro de servicios legales para el condado de San Bernardino ubicado en la ciudad de Rancho de Cucamonga, California, Los Angeles. Este edificio cuenta con el primer sistema de aislamiento con caucho de alto amortiguamiento. El edificio de cuatro pisos, con aproximadamente 15,794 m², cuenta con 98 aisladores en el nivel de aislamiento [14].



Figura N° 1.5 Foothill Communities Law and Justice Center, EE.UU.
(Fuente: <http://angelescontractor.com>)

Una práctica común es usar sistemas de aislamiento mixto, combinando aisladores sísmicos y elementos de amortiguamiento. El sistema de aislamiento debe considerar un amortiguamiento capaz de disipar la energía y proporcionar una fuerza de restauración al sistema de aislamiento que permita al edificio regresar a su posición original después del movimiento sísmico. Esto se puede lograr combinando el sistema de aislamiento con dispositivos de amortiguamiento, tal como amortiguadores de fluido viscoso, amortiguadores de fricción, amortiguadores de plomo o amortiguadores de acero, entre otros, [14].

En Japón, el uso de sistemas de aislamiento mixto es una práctica común, tal como el edificio municipal de la ciudad de Tsukuba, ubicado en la Prefectura de Ibaraki, a 333km de distancia del epicentro del sismo de Tohoku en el año 2011 (ver Figura N° 1.6). El edificio tiene una estructura de concreto reforzado, 7 pisos de altura sobre el sistema de aislamiento mixto en la base y un piso técnico en el nivel de aislamiento, el cual está compuesto por aisladores de caucho natural, aisladores con núcleo de plomo y amortiguadores de acero. [22]

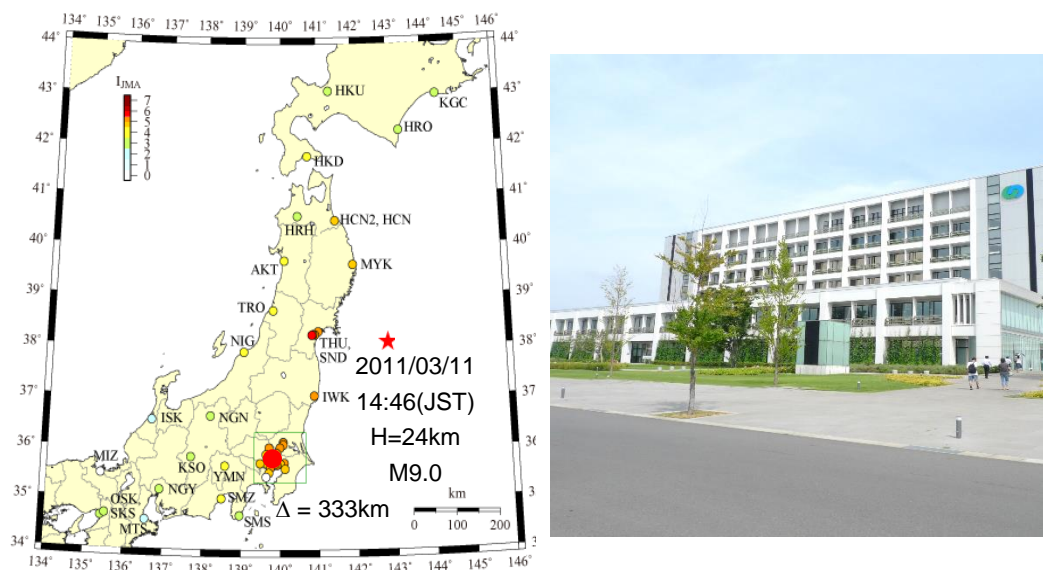


Figura N° 1.6 Edificio municipal de la ciudad de Tsukuba, Japón
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

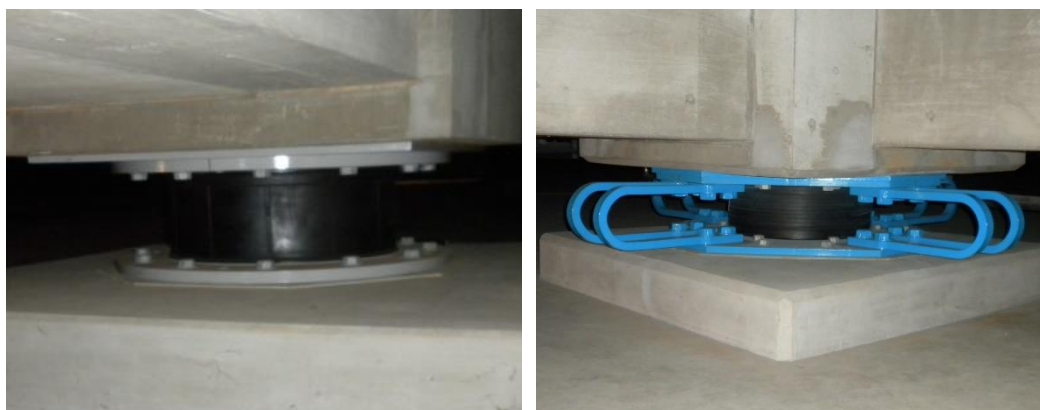


Figura N° 1.7 Sistema de aislamiento mixto
Izq.: Aislador con núcleo de plomo. Der.: Aislador de caucho natural y fusible de acero.
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

El sistema de aislamiento usado en esta edificación cuenta en total, con 20 aisladores de caucho natural, 45 aisladores de caucho con núcleo de plomo y 9 fusibles de acero tal como se aprecia en la Figura N° 1.7 [22]. Del mismo modo, esta edificación demostró la efectividad del sistema de aislamiento mixto, al no presentar daños significativos y que continuó operando después de ocurrido el evento sísmico en el año 2011.

El aislamiento sísmico deslizante consiste en desacoplar el movimiento de la estructura mediante el deslizamiento del soporte sobre una superficie con bajo coeficiente de fricción, de esta manera se limita la cantidad de fuerza cortante transferida al dispositivo de aislamiento deslizante, sin embargo, es necesario que el coeficiente de fricción provea una adecuada resistencia ante la fuerza del viento o sismos de pequeña magnitud [14].

El amortiguamiento del sistema de aislamiento puede lograrse por ejemplo mediante la incorporación de un núcleo de plomo o mediante dispositivos externos que trabajen en conjunto tal como un fusible de plomo o fusible de acero (ver Figura N° 1.8), dichos elementos están concebidos para no soportar las cargas verticales de la edificación pero si para tomar acción frente a fuerzas laterales, cediendo al alcanzar su esfuerzo de fluencia característico, en combinación con los demás dispositivos que conforman el sistema de aislamiento.



Figura N° 1.8 Elementos de amortiguamiento
Izq.: Fusible de plomo. Der.: Fusible de Acero.
(Fuente: Reyna R., 2012)

En la actualidad, el sistema de aislamiento también es usado como una técnica de reforzamiento de edificaciones, para reducir la demanda sísmica mediante el desacoplamiento de la estructura de la fuerza inducida por el movimiento sísmico.

La efectividad del uso del sistema de aislamiento como técnica de reforzamiento quedo evidenciada durante el sismo de Chuetsu en el año 2004, donde el Hospital General de Ojiya (ver Figura N° 1.9), ubicado en la Prefectura de Niigata, Japón, el cual fue reforzado usando un sistema de aislamiento, con el uso de 18 aisladores de caucho natural y 21 amortiguadores deslizantes de fricción, no presento daño alguno durante el sismo, que alcanzó una magnitud de 6.8Mw y continuó operando después de evento sísmico. (ver Figura N° 1.10)



Figura N° 1.9 Hospital General de Ojiya reforzado con aislamiento sísmico
(Fuente: Reyna R., 2012)



Figura N° 1.10 Hospital reforzado con aislamiento sísmico
Izq.: Aislador de caucho natural. Der.: amortiguador deslizante de fricción.
(Fuente: Reyna R., 2012)

El edificio principal de la Autoridad de Información Geoespacial (Geospatial Information Authority of Japan, GSI) fue construido en 1976, el edificio cuenta con seis pisos, construido a base de una estructura de marcos rígidos y muros estructurales. Debido a la antigüedad de la edificación, y para satisfacer la demanda de acuerdo con la normatividad vigente, el edificio fue reforzado usando

un sistema de aislamiento sísmico. El sistema de aislamiento está compuesto por aisladores de núcleo de plomo, rodillos lineales y amortiguadores de aceite. El edificio sufrió el embate del sismo de Tohoku del año 2011 sin presentar daño en su estructura, mostrando así la efectividad del sistema usado. (ver Figura N° 1.11)



Figura N° 1.11 Edificio reforzado del GSI, Japón

(a) Geospatial Information Authority of Japan. (b) Amortiguador con núcleo de plomo. (c) Rodamiento lineal. (d) Amortiguador de aceite.

(Fuente: Reyna R., 2012)

Es posible proporcionar una fuerza de restauración al sistema de aislamiento para proporcionarle al sistema un mecanismo de fuerza restitutiva que permita al edificio regresar a su posición original después del movimiento sísmico, por ejemplo, combinando dispositivos de aislamiento elastomérico con dispersivos de aislamiento deslizante [14].

En Nueva Zelanda, también se realizan reforzamiento de edificaciones usando sistemas de aislamiento sísmico, un ejemplo de esto fue el reforzamiento del edificio del Parlamento de Nueva Zelanda, el cual consiste en una estructura a base de muros de albañilería. El edificio fue reforzado usando más de 514 aisladores con núcleo de plomo [14]. (ver Figura N° 1.12)



Figura N° 1.12 Edificio del Parlamento de Nueva Zelanda
(Fuente: Garevski y Kelly, 1998)

En Italia, es uno de los países europeos donde se ha estudiado activamente el sistema de aislamiento sísmico. La Figura N° 1.13 muestra el edificio del centro administrativo de la Compañía Nacional de Telefonía ubicado en Ancona, Italia; el edificio cuenta con un sistema de aislamiento a base de aisladores de alto amortiguamiento. Este edificio es el primer ejemplo de un edificio aislado en Europa usando ese tipo de aislamiento. [18]



Figura N° 1.13 Compañía Nacional de Telefonía de Italia
(Fuente: <https://www.flickr.com/photos/telecomitalia>)

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

El sistema de aislamiento debe contar con las siguientes propiedades, necesarias para su buen desempeño y así cumplir con su finalidad: “Proteger a las estructuras, habitantes, componentes no estructurales y equipamiento, frente a eventos sísmicos; además asegurar que la estructura mantenga un estado de desempeño operacional después de ocurrido el evento sísmico”.

- Tener la rigidez vertical suficiente para resistir el peso de la estructura y el incremento de carga vertical debido a la fuerza sísmica inducida en la estructura. Además, no debe de producir vibraciones verticales molestas.
- Poseer una suficiente rigidez lateral, de tal manera de no generar desplazamiento ante eventos sísmicos menores, vibraciones externas o ante la fuerza de viento sobre la superestructura.
- Asimismo, poseer una adecuada rigidez lateral capaz de permitir el desplazamiento de la superestructura bajo un umbral de desplazamiento máximo de diseño del sistema de aislamiento.
- Es deseable que el sistema cuente con un mecanismo que proporcione la fuerza restitutiva necesaria para devolver a la superestructura a su posición inicial luego de ocurrido el evento sísmico.
- Además, el sistema de aislamiento debe ser capaz de resistir no solo el evento sísmico principal, sino las posibles replicas que puedan ocurrir.

El mecanismo de funcionamiento del sistema de aislamiento sísmico se puede entender comparando un edificio que cuenta con un sistema de aislamiento sísmico y un edificio convencional tal como se observa en la Figura N° 2.1. Considerando que ambos edificios poseen la misma superestructura, con la salvedad que el edificio convencional se apoya directamente sobre el suelo a través de la cimentación, mientras que la superestructura del edificio con base aislada se encuentra separada del suelo por el sistema de aislamiento, la que a su vez se apoya en una cimentación sobre el suelo. Adicionalmente, cabe señalar que el edificio aislado cuenta con una masa adicional en el nivel de aislamiento que no posee el edificio convencional.

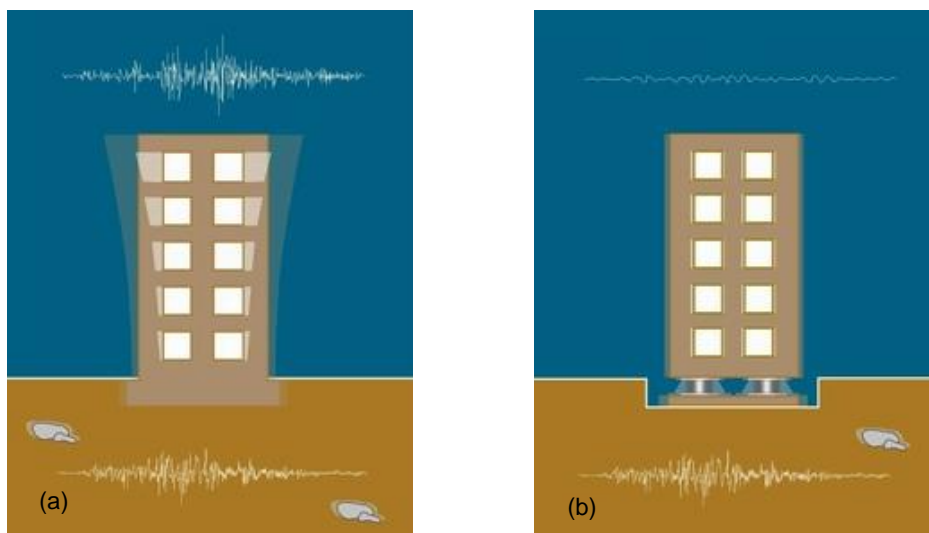


Figura N° 2.1 Mecanismo de funcionamiento del aislamiento sísmico
(a) Edificio convencional sin aislamiento sísmico. (b) Edificio con aislamiento sísmico.
(Fuente: Arriagada J., 2005)

Asumiendo que ambos edificios se encuentran ubicados sobre un mismo tipo de suelo, que la cimentación debajo del sistema de aislamiento y del edificio convencional se comportarán como un empotramiento perfecto, y que ambos edificios serán afectados por la misma onda sísmica y con un mismo nivel de aceleración a nivel del suelo, entonces tal como se aprecia en la Figura N° 2.1, el edificio convencional presentará una mayor deformación lateral de la superestructura, en términos de una mayor distorsión de entrepiso, en comparación con el edificio con base aislada la cual se comportará básicamente como un cuerpo rígido, es decir bajos niveles de distorsión de entrepiso, pero con un alto desplazamiento lateral concentrado en el nivel de aislamiento.

Siendo que la fuerza sísmica producirá cierto nivel de deformación y a su vez cierto nivel de aceleración en la estructura, y además que las deformaciones causadas en la estructura (distorsiones de entrepiso) se traducen en daño estructural, se puede entender a partir de la respuesta de la estructura que: “A menor aceleración, menores desplazamientos, menores daños en la estructura” y “A mayor aceleración, mayor desplazamiento, mayores daños en la estructura”.

Según Bueno y Reyes (2005), la fuerza sísmica transmitida a una estructura se transforma en energía elástica de movimiento y deformación ($E_{elástica}$), y en energía disipada ($E_{disipada}$). Tomando en cuenta el principio de conservación de energía, debe existir un equilibrio energético entre la energía de entrada ($E_{entrada}$)

y la suma de energía elástica y energía disipada, tal como se muestra en la Ecuación (2.1).

$$E_{entrada} = E_{elástica} + E_{disipada} \quad (2.1)$$

Al mismo tiempo, la energía elástica de la estructura está compuesta por energía potencial de deformación elástica ($E_{potencial}$), y energía de movimiento ($E_{cinética}$). Por lo tanto, la energía elástica debe mantener el equilibrio mostrado en la Ecuación (2.2).

$$E_{elástica} = E_{potencial} + E_{cinética} \quad (2.2)$$

Por otro lado, la estructura puede disipar energía a través del amortiguamiento propio de la estructura como energía de amortiguamiento ($E_{amortiguamiento}$), y energía histerética ($E_{histerética}$). La disipación de energía en una estructura es posible mediante amortiguación viscoso, por fricción o por amortiguamiento histerético a través de deformaciones inelásticas o daño estructural. La Ecuación (2.3) muestra el equilibrio en la energía disipada.

$$E_{disipada} = E_{amortiguamiento} + E_{histerética} \quad (2.3)$$

Incorporando las Ecuaciones (2.2) y (2.3) en la Ecuación (2.1), la energía de entrada puede ser expresada tal como muestra la Ecuación (2.4).

$$E_{entrada} = E_{potencial} + E_{cinética} + E_{amortiguamiento} + E_{histerética} \quad (2.4)$$

Por lo tanto, el principio del diseño sismorresistente, está basado en que la capacidad de la disipación de energía de las estructuras debe ser mayor que la demanda de energía histerética. [3]

2.2 TIPOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO

El aislamiento sísmico consta de un conjunto de dispositivos, como aisladores, disipadores de energía o una combinación de estos; los cuales trabajan conjuntamente para desacoplar la superestructura del movimiento del suelo, y así generar el efecto del aislamiento sísmico. Entre los tipos de aislamiento sísmico más usados se tienen: Aislamiento de caucho natural de bajo amortiguamiento, Aislamiento de caucho natural con núcleo de plomo, Aislamiento

de caucho de alto amortiguamiento, Aislamiento de péndulo de fricción deslizante, entre otros. La presente investigación se centrará en el estudio del Aislamiento Sísmico de Caucho, como materia principal de fabricación de dichos dispositivos.

2.2.1 Aislamiento de Caucho Natural de Bajo Amortiguamiento (NRB)

El aislamiento elastomérico de caucho natural (Natural Rubber Bearing, NRB), está conformado por aisladores hechos de caucho natural reforzado con láminas de acero intercaladas, unidas mediante un proceso de vulcanizado (ver Figura N° 2.2). El caucho natural tiene un comportamiento casi elástico tal como se aprecia en la Figura N° 2.3, por lo cual se considera que la disipación de energía no es significativa.

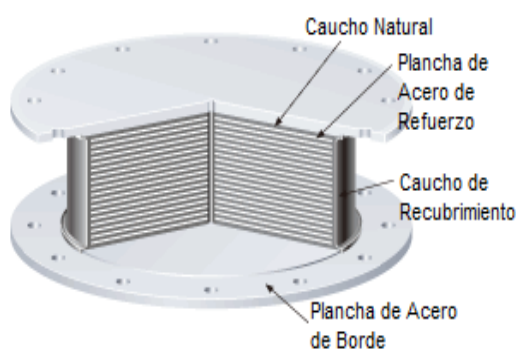


Figura N° 2.2 Natural Rubber Bearing (NRB)
(Fuente: Adaptado de <http://www.bridgestone.com>)

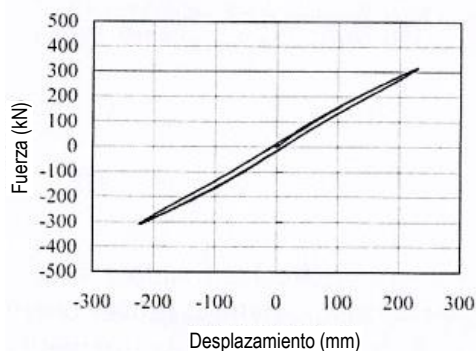


Figura N° 2.3 Curva de histéresis – NRB
(Fuente: Adaptado de Higashino M. y Okamoto S., 2006)

2.2.2 Aislamiento de Caucho Natural con Núcleo de Plomo (LRB)

El aislamiento elastomérico de caucho natural con núcleo de plomo (Lead-plug Rubber Bearing, LRB), básicamente es un aislador de caucho natural el cual adicionalmente cuenta con un núcleo de plomo (ver Figura N° 2.4). El caucho natural de comportamiento elástico y el núcleo de plomo de comportamiento plástico conforman el aislador el cual en su conjunto tiene un comportamiento elastoplástico tal como se observa en la Figura N° 2.5. Debido al núcleo de plomo se consigue la disipación de energía del aislador.

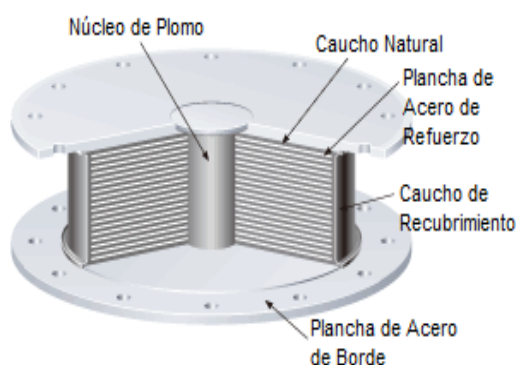


Figura N° 2.4 Lead-plug Rubber Bearing (LRB)
(Fuente: Adaptado de <http://www.bridgestone.com>)

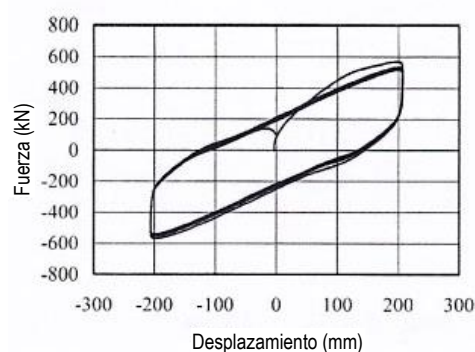


Figura N° 2.5 Curva de histéresis LRB
(Fuente: Adaptado de Higashino M. y Okamoto S., 2006)

2.2.3 Aislamiento de Caucho de Alto Amortiguamiento (HRB)

El aislamiento elastomérico de caucho de alto amortiguamiento (High-damping Rubber Bearing, HRB), está conformado por aisladores hechos de caucho de alto amortiguamiento (caucho modificado químicamente), reforzado con láminas de acero intercaladas, unidas mediante un proceso de vulcanizado (ver Figura N° 2.6). El caucho usado en estos dispositivos posee un mejor desempeño que el caucho natural teniendo un comportamiento histerético no lineal tal como se muestra en la Figura N° 2.7, debido a esto se tiene una alta disipación de energía debido al amortiguamiento del caucho.

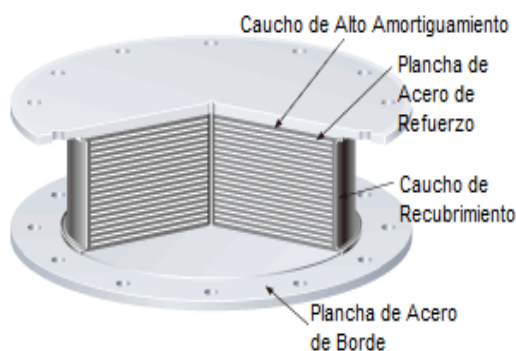


Figura N° 2.6 High Damping Rubber Bearing (HRB)
(Fuente: Adaptado de <http://www.bridgestone.com>)

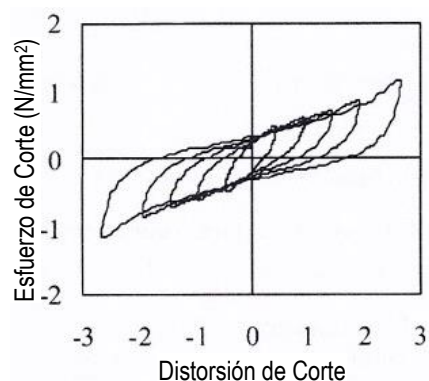


Figura N° 2.7 Curva de histéresis HRB
(Fuente: Adaptado de Higashino M. y Okamoto S., 2006)

2.3 ¿PORQUE USAR EL AISLAMIENTO SÍSMICO?

El aislamiento sísmico es una técnica de control pasivo de la respuesta de edificios, el cual en la actualidad ha ratificado su efectividad para la disipación de energía inducida por un sismo, a través de la deformación del nivel de aislamiento, de esta manera se logra desacoplar la superestructura del movimiento del suelo.

El aislamiento en la base incrementa el periodo fundamental de vibración de la estructura, por lo cual se reduce la aceleración de respuesta y la fuerza sísmica inducida en la estructura. El segundo modo de vibración que produce deformación en una estructura esencialmente no es excitado debido al movimiento sísmico, aunque la aceleración de entrada sea grande. Esto puede ser explicado como: el primer modo de vibración de la estructura aislada en la base involucra solo deformación a nivel del sistema de aislamiento y la superestructura se comporta esencialmente como cuerpo rígido. Por lo tanto, el componente del primer modo de vibración de la distribución de fuerza sísmica inducida a la estructura es prácticamente el mismo, y el componente aportado por el segundo modo es muy pequeño por lo cual se no se considera (Chopra A. K., 2007) [5].

Como se muestra en la Figura N° 2.8, la aceleración máxima de respuesta de una estructura depende del amortiguamiento de la misma, por ende: “A mayor amortiguamiento, menor será su respuesta de aceleración”. Así mismo, en términos del periodo fundamental de vibración de una estructura, se sabe que: “Periodos cortos corresponden a edificaciones de baja y mediana altura con una alta aceleración de respuesta, mientras que periodos largos a edificaciones de gran altura con una baja aceleración de respuesta”, por lo tanto, usando un sistema de aislamiento podemos incrementar el periodo natural de vibración de una estructura y como consecuencia reducir notablemente la aceleración de respuesta de la estructura.

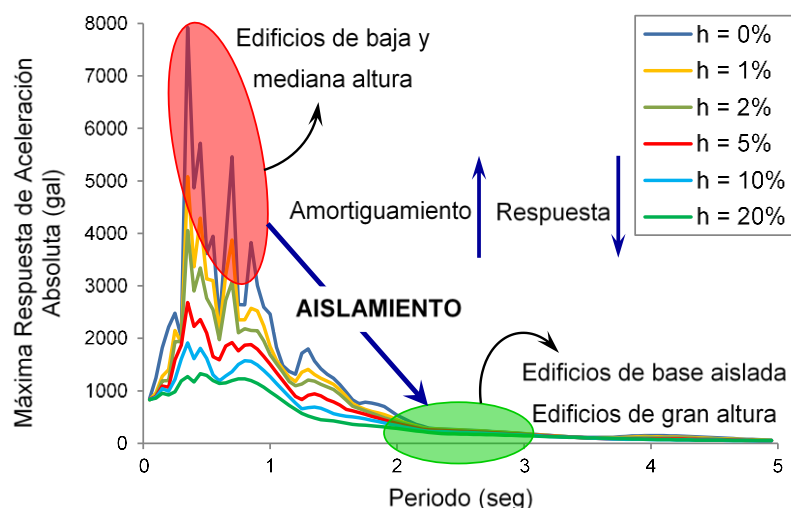


Figura N° 2.8 Espectro de respuesta de aceleración máxima.
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

En términos del espectro de desplazamiento máximo, tal como se muestra en la Figura N° 2.9, “Periodos cortos corresponden a estructuras de mediana y baja altura con un determinado nivel de desplazamiento de la estructura, mientras que para periodos largos, corresponden a edificaciones de gran altura con un mayor nivel de desplazamiento”, por lo tanto al introducir un sistema de aislamiento sísmico, siendo que el periodo fundamental de vibración será incrementado, el desplazamiento de respuesta también se incrementará, pero dicho desplazamiento estaría concentrado a nivel del sistema de aislamiento debido al desacoplamiento de la estructura.

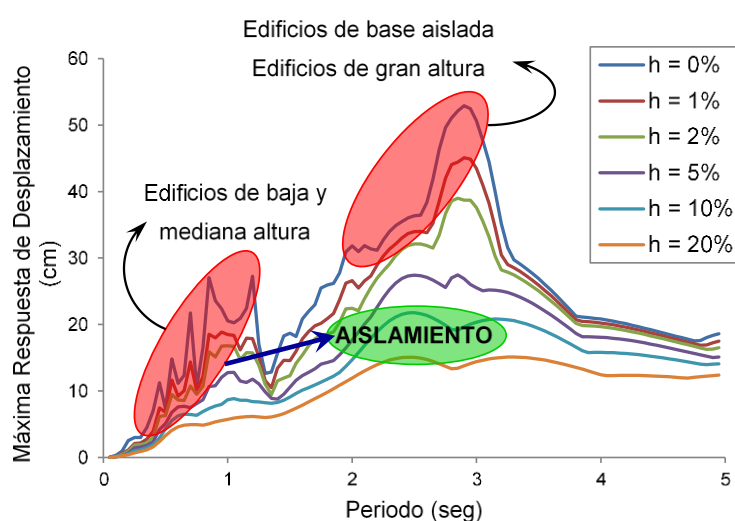


Figura N° 2.9 Espectro de respuesta de desplazamiento máximo.
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

2.3.1 Ventajas de usar el Aislamiento Sísmico

Para responder la pregunta, ¿Por qué usar el aislamiento sísmico?, a continuación, se mencionan las principales ventajas de usar el aislamiento sísmico en edificaciones:

- Reduce la distorsión de entrepiso en el edificio.
- Reduce la aceleración de respuesta en el edificio.
- Incrementa el periodo natural de vibración del edificio.
- Permite grandes desplazamientos a nivel de la base aislada.
- Recomendado para usar en suelos rígidos.

2.3.2 Desventajas de usar el Aislamiento Sísmico

Sin embargo, el aislamiento sísmico también presenta algunas desventajas o limitaciones para la efectiva aplicación de este sistema; entre las principales desventajas se encuentran:

- No tiene buen desempeño en edificios de gran altura.
- No recomendable ser usado en suelos blandos.
- Permite la vibración vertical del edificio.
- Fatiga debido al desgaste del elastómero.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS NUMÉRICO

3.1 DEL ANÁLISIS NUMÉRICO

La presente sección muestra el marco teórico de la interacción del sistema de aislamiento con la estructura; además se presenta el comportamiento del sistema de aislamiento bajo ciertas demandas de cargas tales como: compresión, corte, flexión, pandeo y estabilidad del sistema de aislamiento, así como también el modelo bilineal fuerza-desplazamiento que se usará para caracterizar el comportamiento del sistema de aislamiento. Por otro lado, el análisis numérico basado en los resultados experimentales se presenta en el Capítulo V.

3.2 SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

Considerando un sistema de un grado de libertad (1GDL), tal como se muestra en la Figura N° 3.1, se asume que la estructura se comporta idealmente como un cuerpo rígido, para el cual, las deformaciones de entrepiso no son significativas, tomando en cuenta una masa concentrada m , la cual es soportada por el sistema de aislamiento de rigidez lateral k y coeficiente de amortiguamiento c .

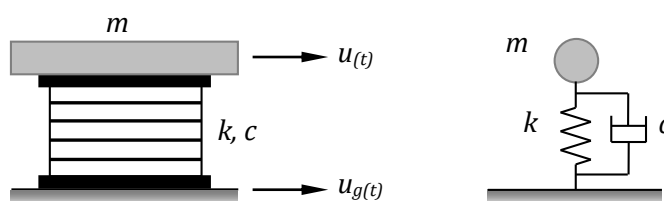


Figura N° 3.1 Modelo de un grado de libertad
(Fuente: Elaboración propia)

La ecuación de movimiento está definida como:

$$m\ddot{u}_{(t)} + c(\dot{u}_{(t)} - \dot{u}_{g(t)}) + k(u_{(t)} - u_{g(t)}) = 0 \quad (3.1)$$

Definiendo el desplazamiento, velocidad y aceleración relativa como:

$$\left. \begin{aligned} v(t) &= u(t) - u_g(t) \\ \dot{v}(t) &= \dot{u}(t) - \dot{u}_g(t) \\ \ddot{v}(t) &= \ddot{u}(t) - \ddot{u}_g(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

La ecuación de movimiento se puede reescribir reemplazando la Ecuación (3.2) en la Ecuación (3.1).

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.3)$$

Donde:

$u(t)$, $\dot{u}_g(t)$ y $\ddot{u}_g(t)$ son el desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta.
 $v(t)$, $\dot{v}(t)$ y $\ddot{v}(t)$ son el desplazamiento, velocidad y aceleración relativa.

3.3 INTERACCIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO CON LA ESTRUCTURA

Para analizar la interacción del sistema de aislamiento con la estructura, se parte de un modelo idealizado de la estructura, donde se puede considerar un modelo equivalente de la estructura, reduciendo a un grado de libertad equivalente, y al mismo tiempo sobre un sistema de aislamiento tal como se muestra en la Figura N° 3.2. Donde m_b y m_s corresponden a la masa total del sistema de aislamiento y de la superestructura respectivamente; k_b y k_s corresponden a la rigidez lateral del sistema de aislamiento y de la superestructura respectivamente, y c_b y c_s corresponden al coeficiente de amortiguamiento del sistema de aislamiento y de la superestructura respectivamente.

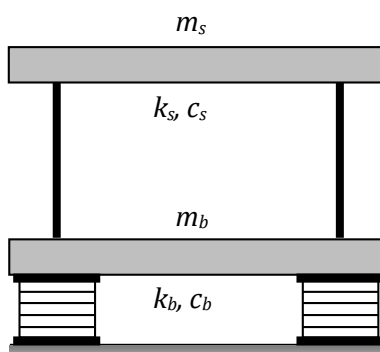


Figura N° 3.2 Estructura de un nivel con aislamiento sísmico
 (Fuente: Elaboración propia)

Del modelo de una estructura de un nivel con sistema de aislamiento, se puede determinar sus modos de vibración tal como se aprecia en la Figura N° 3.3 tomando en cuenta las siguientes suposiciones: [14]

- La masa de la superestructura es mayor a la masa del sistema de aislamiento, donde se define: $\eta = m_s / (m_s + m_b)$.
- La frecuencia natural de vibración de la superestructura es mucho mayor a la frecuencia natural de vibración del sistema de aislamiento; es decir: $\omega_s = \sqrt{k_s / m_s} \gg \omega_b = \sqrt{k_b / (m_s + m_b)}$, de donde se define: $\epsilon = (\omega_b / \omega_s)^2$, el cual debe ser del orden de magnitud de 10^{-2} .
- Los factores de amortiguamiento de la superestructura y del sistema de aislamiento, definidos por $h_s = c_s / 2m_s\omega_s$ y $h_b = c_s / 2(m_s + m_b)\omega_s$ están en el mismo orden de magnitud que ϵ .

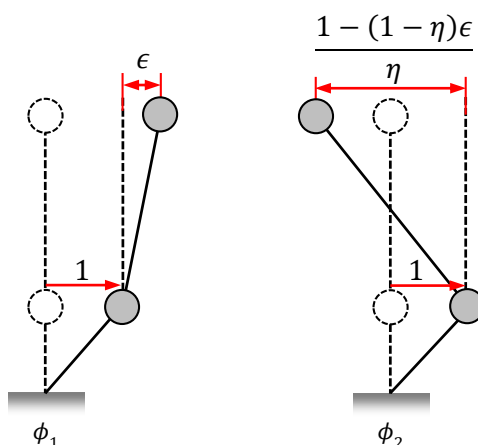


Figura N° 3.3 Modos de vibración
 (Fuente: Kelly J.M., 1997)

Del mismo modo, se puede analizar un modelo de múltiples grados de libertad compuesto por masas concentradas conectadas y un sistema de aislamiento en la base tal como se muestra en la Figura N° 3.4.

La Figura N° 3.5 muestra el equilibrio dinámico de un modelo de múltiples grados de libertad con aislamiento sísmico en la base. Considerando para una masa m_i , su correspondiente fuerza inercial, fuerzas de restauración elástica proporcionado por los entresijos superior e inferior respecto del nivel i , así como la fuerza de amortiguamiento respectivo. [24]

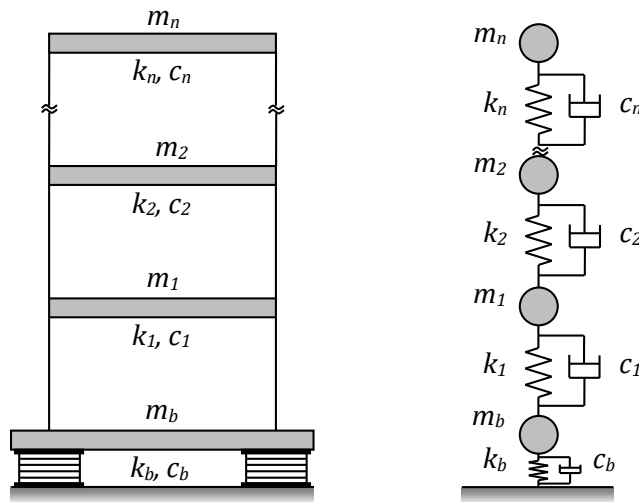


Figura N° 3.4 Modelo de múltiples grados de libertad
(Fuente: Elaboración propia)

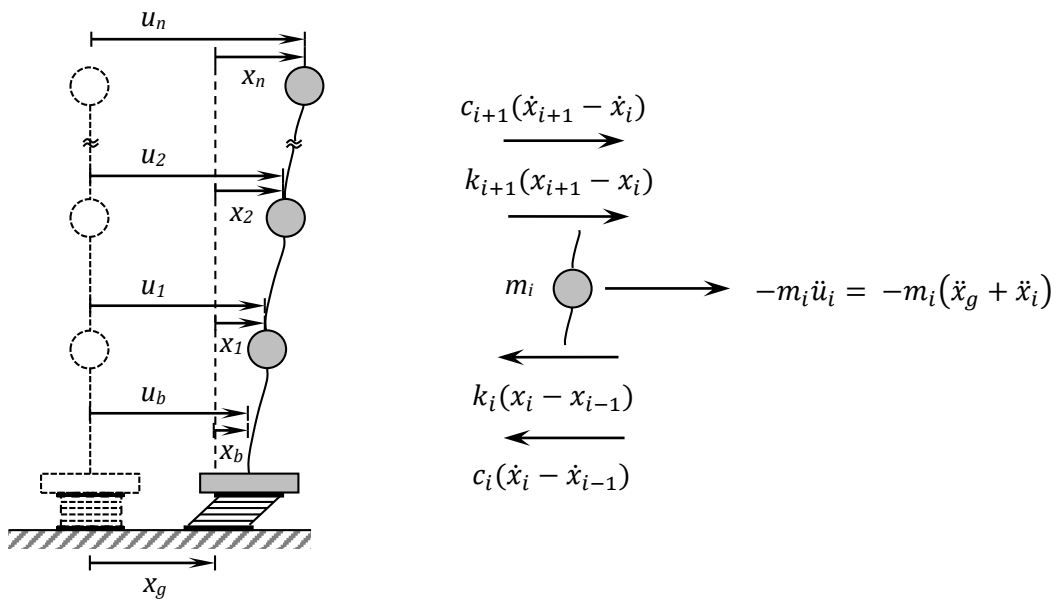


Figura N° 3.5 Equilibrio dinámico de un modelo de N grados de libertad
(Fuente: Elaboración propia)

Tomando en consideración el equilibrio dinámico de una de las masas concentradas tal como se aprecia en la Figura N° 3.5, la ecuación de movimiento para un sistema de múltiples grados de libertad con aislamiento en la base se obtiene de la siguiente forma:

$$\left. \begin{aligned} c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n(x_n - x_{n-1}) &= -m_n\ddot{u}_n \\ &\vdots \\ c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + k_i(x_i - x_{i-1}) - c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) - k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) &= -m_i\ddot{u}_i \\ &\vdots \\ c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k_1(x_1 - x_b) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) &= -m_1\ddot{u}_1 \\ c_b\dot{x}_b + k_b x_b - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) - k_1(x_1 - x_b) &= -m_b\ddot{u}_b \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

De la Ecuación (3.4), la ecuación de movimiento para un sistema de múltiples grados de libertad con aislamiento sísmico en la base queda definida como:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = [M]\{r\}\{\ddot{x}_G\} \quad (3.5)$$

Donde: $[M]$ es la matriz de masas definida como:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$[K]$ es la matriz de rigidez definida como:

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_b + k_1) & -k_1 & 0 & \dots & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 & \dots & 0 \\ 0 & -k_2 & (k_2 + k_3) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_n \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$\{x\}$ y $\{r\}$ son vectores de desplazamiento y vector unitario respectivamente.

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix}, \quad \{r\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

Además, $[C]$ es considerada como la matriz de amortiguamiento de Rayleigh definida como:

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] \quad (3.9)$$

La matriz de amortiguamiento tiene una forma especial y es llamado amortiguamiento proporcional. Como el mecanismo de amortiguamiento real de una estructura es difícil de determinar, usualmente se asume una apropiada matriz

de amortiguamiento proporcional, el cual puede representar el comportamiento global del amortiguamiento durante la respuesta del sistema

La matriz de amortiguamiento es determinada usualmente mediante el uso los factores de amortiguamiento modal, a_0 y a_1 , los cuales están en función a un amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez respectivamente, tal como se muestra en las Ecuaciones (3.10) y (3.11).

$$a_0 = 2\omega_1\omega_2 \left(\frac{h_1\omega_2 - h_2\omega_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \right) \quad (3.10)$$

$$a_1 = 2 \left(\frac{h_2\omega_2 - h_1\omega_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \right) \quad (3.11)$$

3.4 PARÁMETROS DEL COMPORTAMIENTO DEL AISLADOR

3.4.1 Compresión

La frecuencia de vibración vertical de una estructura sísmicamente aislada es un importante criterio de diseño, tomando en cuenta el confort que se requiere frente a indeseables vibraciones verticales por parte de los usuarios. Con el objetivo de predecir la frecuencia vertical de vibración, es necesario conocer la rigidez vertical del aislador bajo una carga vertical específica. (ver Figura N° 3.6) [14][15]

La rigidez vertical del aislador de caucho está definida por la siguiente expresión:

$$K_V = \frac{E_c A_r}{H_r} \quad (3.12)$$

Donde:

- A_r : Área de la sección del aislador.
- H_r : Espesor total del caucho.
- E_c : Módulo de compresibilidad instantáneo del compuesto caucho-acero, bajo un determinado nivel de carga vertical.

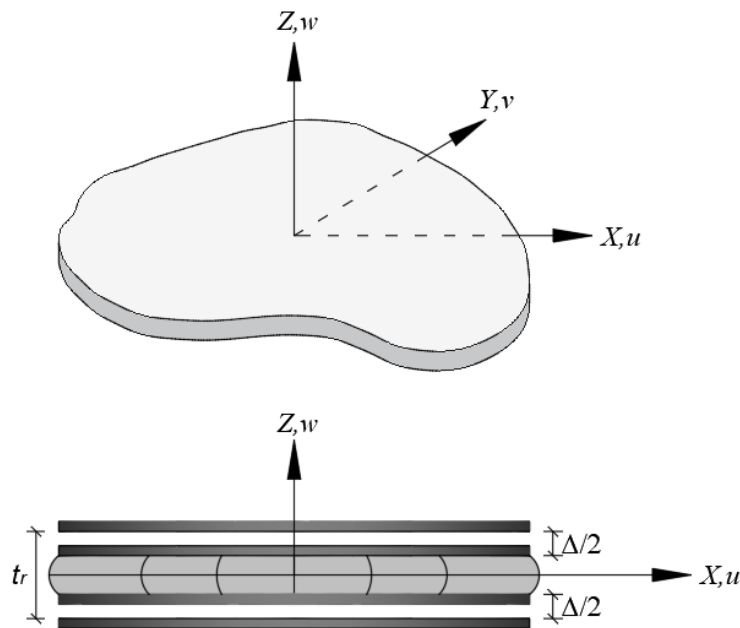


Figura N° 3.6 Aislador bajo compresión
 (Fuente: Kelly J.M., 1997)

El módulo de compresibilidad E_c : para una lámina de caucho, está controlado por el factor de forma primario S_1 :

$$S_1 = \frac{\text{Área cargada}}{\text{Área lateral}} \quad (3.13)$$

De las investigaciones realizadas por Rocard, Gent & Lindley y Gent & Meinecke, Kelly [14] presenta expresiones para calcular el módulo de compresibilidad de aisladores de caucho, siendo válido para factores de forma primario S_1 mayores que 5.

Considerando un aislador de sección cuadrada de lado a y espesor de lámina de caucho t_r :

$$S_1 = \frac{a}{4t_r} \quad (3.14)$$

$$E_c = 6.73GS_1^2$$

Considerando un aislador de sección circular de radio R y espesor de lámina de caucho t_r :

$$S_1 = \frac{R}{2t_r} \quad (3.15)$$

$$E_c = 6GS_1^2$$

Considerando un aislador de sección anular de radio exterior R , radio interior r y espesor de lámina de caucho t_r :

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{R-r}{2t_r} \\ E_c &= 6GS_1^2\lambda \\ \lambda &= \frac{(1+\psi^2) + (1-\psi^2)/\ln\psi}{(1-\psi)^2} \\ \psi &= r/R \end{aligned} \right\} (3.16)$$

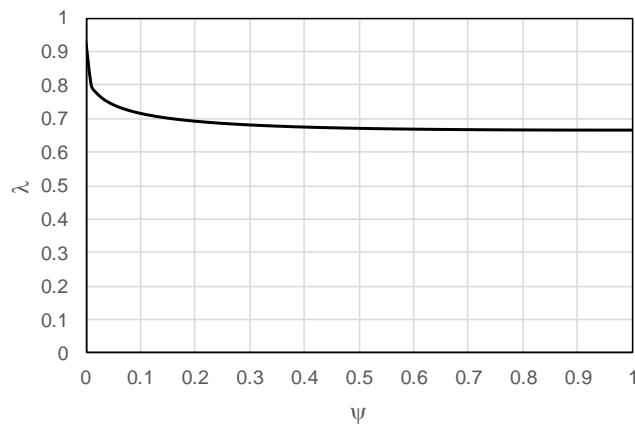


Figura N° 3.7 Tendencia del módulo de compresión
(Fuente: Elaboración propia)

La variación de λ en función de ψ se puede apreciar en la Figura N° 3.7, siendo que ψ varía entre 0 y 1, se puede apreciar que para $\psi = 0 \rightarrow \lambda = 1 \rightarrow E_c = 6GS_1^2$; mientras que para $\psi = 1 \rightarrow \lambda \approx 2/3 \rightarrow E_c = 4GS_1^2$; además, se puede apreciar que λ converge rápidamente a $2/3$. (ver Figura N° 3.7)

3.4.2 Corte

Bajo una carga de compresión, la interacción entre la lámina de caucho y de acero, unidos por un proceso de vulcanizado, produce un esfuerzo de corte entre la lámina de caucho y la lámina de acero, tal como se aprecia en la Figura N° 3.8. Según Kelly [14], considerando un aislador de sección circular de radio R y espesor de la lámina de caucho t_r , el esfuerzo máximo de corte ocurre en el borde de la capa superior e inferior de la interfaz entre la lámina de caucho y la lámina de acero, y viene dado por la Ecuación (3.7).

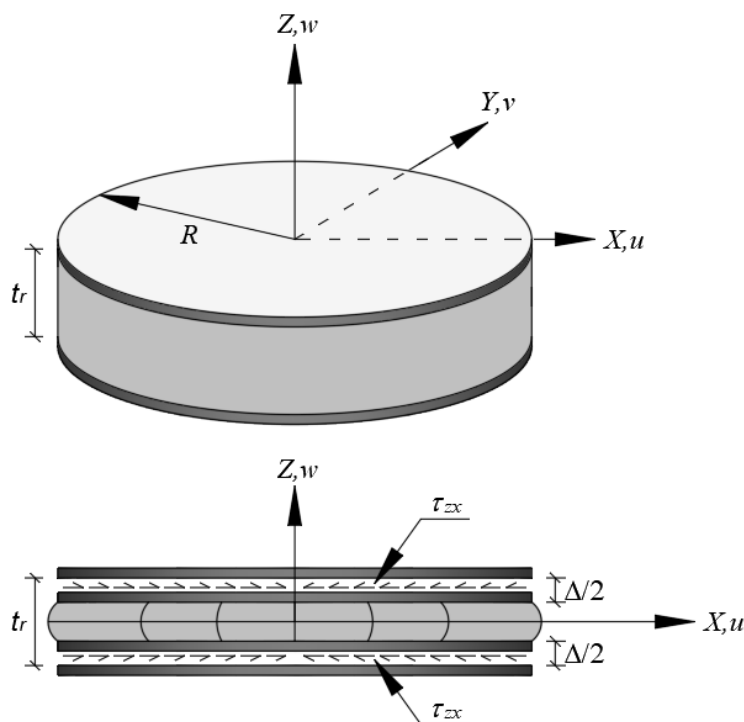


Figura N° 3.8 Esfuerzo cortante debido a compresión
(Fuente: Kelly J.M., 1997)

$$\left. \begin{aligned}
 \tau_{max} &= \frac{3GR}{t_r} \varepsilon_c \\
 \varepsilon_c &= \frac{\Delta}{t_r} \\
 \gamma_c &= 6S_1 \varepsilon_c \\
 \gamma_{c_{prom}} &= \sqrt{6} S_1 \varepsilon_c
 \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Donde:

- τ_{max} : Esfuerzo máximo de corte en la interfaz caucho-acero.
- ε_c : Deformación unitaria del caucho bajo carga de compresión.
- Δ : Deformación vertical bajo carga de compresión.
- γ_c : Deformación unitaria de corte del caucho producido por una carga de compresión.
- γ_{prom} : Deformación unitaria de corte promedio del caucho producido por una carga de compresión.

3.4.3 Flexión

Para el análisis por flexión, se supone que el aislador está sujeto a la acción de momento puro M , tal como se muestra en la Figura N° 3.9. El ángulo relativo formado entre la plancha de acero superior e inferior en un estado deformado, denotado por α , y el radio de curvatura ρ , generado por la deformación, están relacionados por la siguiente expresión: [19]

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\alpha}{t_r} \tag{3.18}$$

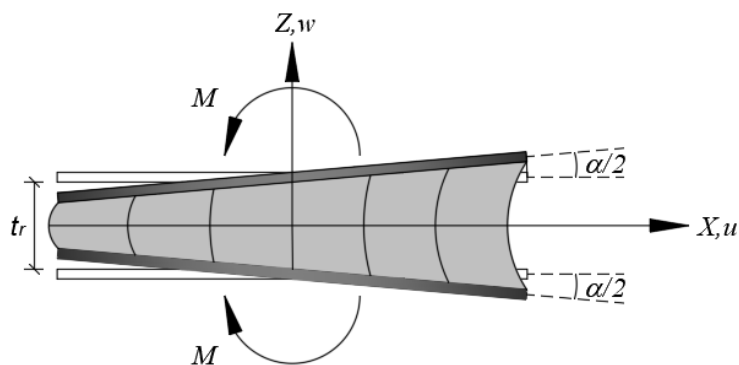


Figura N° 3.9 Aislador bajo flexión
 (Fuente: Kelly J.M., 1997)

Aplicando por analogía la teoría de vigas, donde el momento M está definido por la Ecuación (3.19), Kelly [14] presenta la solución a dicha ecuación considerando un aislador de sección circular de radio R y espesor de la lámina de caucho t_r y momento de inercia $I = \pi R^4/4$, quedando definido por la Ecuación (3.20).

$$M = EI \frac{\alpha}{t_r} \quad (3.19)$$

$$M = \frac{\pi R^6}{8} \left(\frac{\alpha G}{t_r^3} \right) \quad (3.20)$$

Para un aislador de sección circular, considerando $E = E_c = 6GS_1^2$ y $S = R/2t_r$, tenemos:

$$M = \frac{3\pi R^6}{8} \left(\frac{\alpha G}{t_r^3} \right) \quad (3.21)$$

$$EI = E_c \left(\frac{I}{3} \right) \quad (3.22)$$

Para un aislador de sección anular de radio exterior R , radio interior r y espesor de lámina de caucho t_r : ($\psi = r/R$)

$$M = (1 - \psi^2) \frac{\pi R^6}{8} \left(\frac{\alpha G}{t_r^3} \right) \quad (3.23)$$

Adicionalmente, la deformación unitaria de corte producida por la acción de la flexión sobre el aislador [19], está definido a continuación:

$$\gamma_b = 6S_1 \varepsilon_b \quad (3.24)$$

Donde $\varepsilon_b = R(\alpha/t_r)$, es la deformación unitaria en compresión en el borde producido por flexión, y la deformación de corte promedio está definido por:

$$\gamma_{b_{prom}} = \sqrt{2} S_1^2 \alpha = \frac{\sqrt{2}}{4} S_1 \varepsilon_b \quad (3.25)$$

Cuando el factor de forma es muy grande, el efecto de la compresibilidad sobre la lámina de caucho toma gran importancia y puede ser aproximada como:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E'_c} + \frac{1}{E_\infty} \quad (3.26)$$

Donde $1/E'_c$ es el módulo de compresibilidad asumiendo un comportamiento incompresible y E_∞ es el módulo de compresibilidad del caucho. El módulo de compresibilidad asumido para el caucho es $E_\infty = 2000 \text{ MPa} = 20000 \text{ kgf/cm}^2$.

$$E_c = \frac{E'_c E_\infty}{E'_c + E_\infty} \quad (3.27)$$

Para un aislador de sección circular, considerando $E'_c = 6GS_1^2$ y $S = R/2t_r$

$$E_c = \frac{6GS_1^2 E_\infty}{6GS_1^2 + E_\infty} = 6GS_1^2 \left(\frac{1}{1 + 6GS_1^2/E_\infty} \right) \quad (3.28)$$

3.4.4 Pandeo

Debido a la combinación de cargas axiales y momentos flectores actuantes en el sistema de aislamiento que causan deformaciones laterales, estos dispositivos son susceptibles a la ocurrencia del efecto de pandeo tal como se aprecia en la Figura N° 3.10. Definiendo la rigidez de corte como se muestra en la Ec.(3.29), y la rigidez por flexión en la Ecuación (3.30): [19]

$$P_S = GA_S = GA \frac{H}{H_r} \quad (3.29)$$

$$EI_S = E_c \left(\frac{I}{3} \right) \frac{H}{H_r} \quad (3.30)$$

Donde G , es el módulo de corte del material; $A_S = A(H/H_r)$, es el área efectiva de corte; A , es el área de la sección del aislador, H , es la altura total del aislador, H_r , es la altura total del caucho, E_c : Módulo de compresibilidad e I , el momento de inercia de la sección.

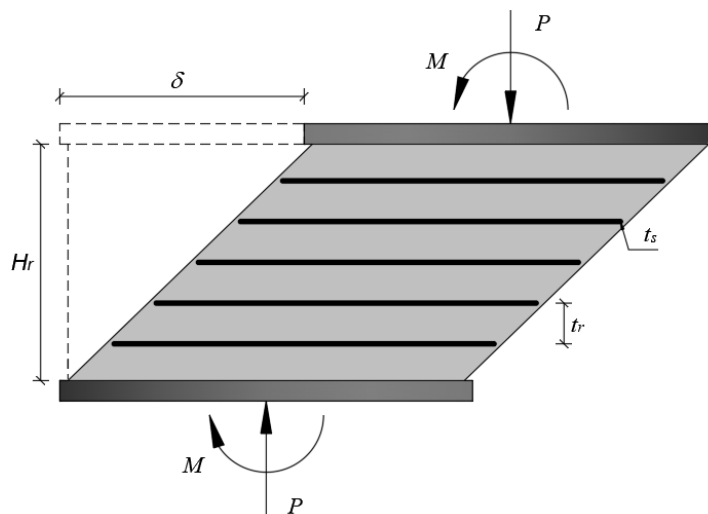


Figura N° 3.10 Aislador bajo carga axial y flexión
(Fuente: Adaptado de Kelly J.M., 1997)

La rigidez lateral total del aislador está definida por:

$$K_H = \frac{GA_S}{H} = \frac{GA}{H_r} \quad (3.31)$$

La fuerza de pandeo de Euler, considerando un comportamiento como de columna sin deformaciones de corte:

$$P_E = \pi^2 \frac{EI_S}{H^2} \quad (3.32)$$

El aislador se considera empotrado en la base, mientras que se restringe la rotación de la parte superior; sin embargo, tiene libertad de movimiento lateral. En estas condiciones la carga crítica de pandeo viene dada por la solución de la siguiente ecuación:

$$P^2 + PP_S - P_S P_E = 0 \quad (3.33)$$

Resolviendo la Ecuación (3.33), se obtiene la carga crítica definida por:

$$P_{crit} = \frac{-P_S + \sqrt{P_S^2 + 4P_S P_E}}{2} \quad (3.34)$$

Asumiendo que el área efectiva de corte es aproximadamente igual al área de la sección del aislador ($A \approx A_S$) y usando la Ecuación (3.29) y (3.30), la fuerza de pandeo de Euler se puede reescribir de la siguiente forma:

$$P_E = 2\pi^2 G S_1^2 I \left(\frac{H}{H^2 H_r} \right) \quad (3.35)$$

Para la mayoría de aisladores con $S \geq 5$ y $P_E \gg P_S$, la carga crítica puede ser aproximada por:

$$P_{crit} = \sqrt{P_S P_E} \quad (3.36)$$

Usando la Ecuación (3.29), (3.30) y (3.35) en la Ecuación (3.36):

$$P_{crit} = \sqrt{2\pi} \frac{G A S_1 r}{H_r} \quad (3.37)$$

Donde: $r = \sqrt{I/A}$, es el radio de giro.

Definiendo el factor de forma del aislador S_2 como:

$$S_2 = \begin{cases} \frac{2R}{H_r} & \rightarrow \text{Sección Circular} \\ \frac{a}{H_r} & \rightarrow \text{Sección Cuadrada} \end{cases} \quad (3.38)$$

Tomando en cuenta el peso W soportado por el aislador y la frecuencia de vibración horizontal ω_H relacionados por la Ecuación (3.39).

$$\omega_H^2 = \frac{K_H}{W} g \quad (3.39)$$

El factor de seguridad para el pandeo, definido por $FS = P_{crit}/W$, queda expresado de la siguiente manera:

$$FS = \sqrt{2\pi} \frac{S_1 \omega_H^2 r}{g} \quad (3.40)$$

Sin embargo, tomando en cuenta la influencia de la carga vertical P que actúa sobre el aislador, cuando la carga soportada por el aislador es comparable a la carga de pandeo, la rigidez horizontal sufre una reducción, la cual puede expresarse como:

$$K_H = \frac{GA}{H_r} \left(1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right) \quad (3.41)$$

3.4.5 Estabilidad

Considerando un estado de deformación horizontal D , correspondiente a un aislador de sección circular, el área reducida A' , que soportará la carga vertical viene dada por la siguiente expresión: (ver Figura N° 3.11) [19]

$$A' = 2R^2(\theta - \sin\theta\cos\theta) = 2R^2 \left(\frac{\pi}{2} - \phi - \sin\phi\cos\phi \right) \quad (3.42)$$

Haciendo el siguiente cambio de variable:

$$d = \frac{D}{2R} \quad y \quad a = \frac{A'}{\pi R^2} \quad (3.43)$$

Donde d , expresa el traslape longitudinal respecto del diámetro de la sección; y a expresa la relación del traslape en función del área de la sección.

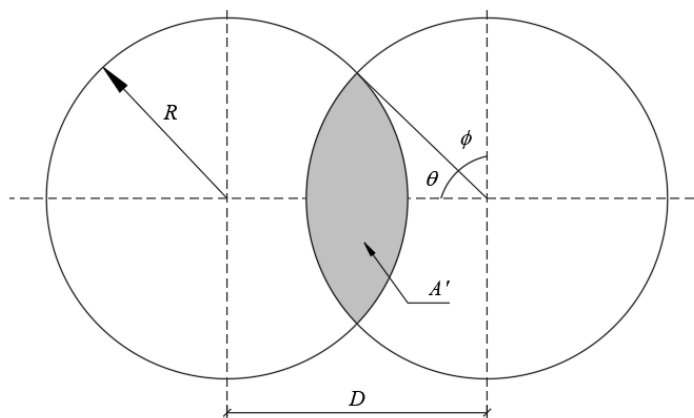


Figura N° 3.11 Aislador bajo carga axial y flexión
(Fuente: Naeim F., 1999)

El área reducida puede reescribirse de la siguiente manera:

$$a = \frac{2}{\pi}(\theta - \sin\theta\cos\theta) = 1 - \frac{2}{\pi}\phi - \frac{2}{\pi}\sin\phi\cos\phi \quad (3.44)$$

La solución de la Ecuación (3.44) se puede apreciar en la gráfica siguiente:

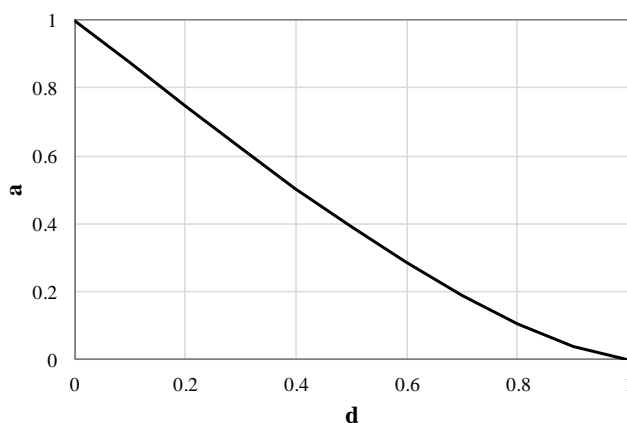


Figura N° 3.12 Area reducida normalizada vs traslape
(Fuente: Elaboracion propia)

Para un aislador de sección circular, el desplazamiento crítico D_{crit} viene dado por la solución a la siguiente expresión:

$$D_{crit} = 2Rd_{crit} \quad , \quad a = \left(\frac{P}{P_{crit}}\right)^2 \quad (3.45)$$

3.5 MODELO BILINEAL FUERZA-DESPLAZAMIENTO

El modelo básico para estudiar la relación fuerza-desplazamiento del comportamiento de un aislador es un modelo histérico bilineal, el cual está caracterizado por una rigidez elástica inicial K_1 , una rigidez post-fluencia K_2 y una resistencia característica Q . La Figura N° 3.13 muestra gráficamente el lazo histérico del modelo bilineal. [22]

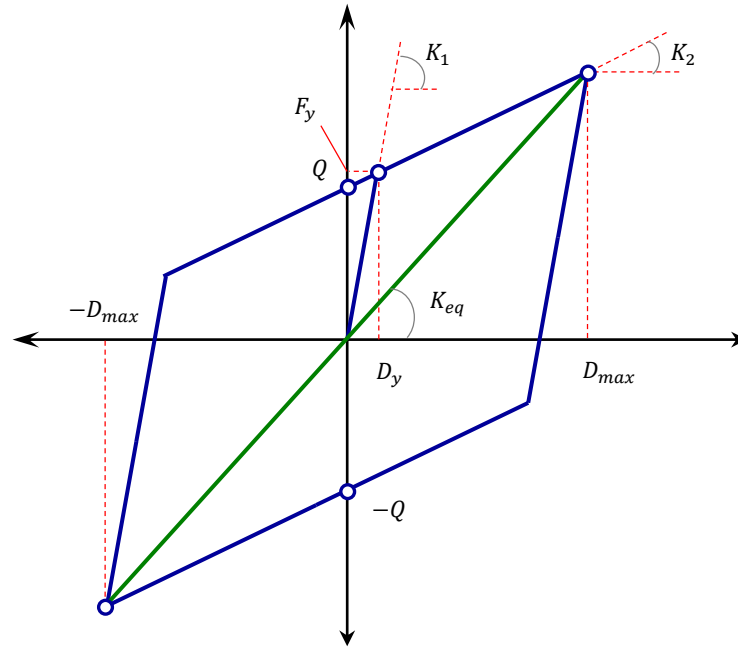


Figura N° 3.13 Modelo bilineal elasto-plástico
(Fuente: Elaboración propia)

La rigidez inicial del aislador puede tomarse proporcionalmente a la rigidez post fluencia:

$$K_1 = \beta K_2 \quad , \quad \beta = 10 \sim 15 \quad (3.46)$$

La rigidez equivalente del dispositivo se expresa como sigue:

$$K_{eq} = K_2 + \frac{Q}{D_{max}} \quad (3.47)$$

El amortiguamiento equivalente queda definido como:

$$h_{eq} = \frac{2Q(D_{max} - D_y)}{\pi K_{eq} D_{max}^2} \quad (3.48)$$

Donde el desplazamiento de fluencia viene dado por:

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (3.49)$$

La energía disipada por ciclo del lazo histerético está definida por:

$$W_D = 4Q(D - D_y) \quad (3.50)$$

Definiendo la ductilidad como la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento de fluencia:

$$u = \frac{D_{max}}{D_y} \quad (3.51)$$

Considerando un patrón de desplazamientos tal como se muestra en la Figura N° 3.14, el comportamiento histerético de un aislador usando un modelo bilineal puede apreciarse en la Figura N° 3.15.

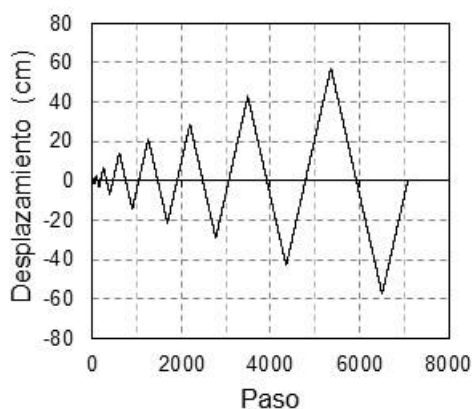


Figura N° 3.14 Patrón de desplazamiento
 (Fuente: Elaboración propia)

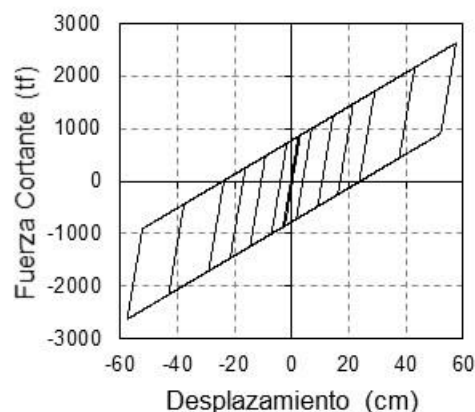


Figura N° 3.15 Histéresis usando un modelo bilineal
 (Fuente: Elaboración propia)

El modelo bilineal presentado, puede adaptarse para modelar: un sistema de aislamiento de caucho natural, un sistema de aislamiento de caucho natural con núcleo de plomo o un sistema de aislamiento con caucho de alto amortiguamiento. Aunque no se contempla en la presente investigación, también puede adaptarse un modelo bilineal modificado [16][17], tomando en consideración la degradación de la rigidez en función de la deformación de corte del aislador.

CAPÍTULO IV: PARTE EXPERIMENTAL

4.1 ENSAYO DE MODULO DE CORTE

4.1.1 Objetivo

El módulo de corte de caucho es un parámetro importante para el diseño geométrico del dispositivo de aislamiento, además para conocer su comportamiento. El objetivo principal es obtener el módulo de corte experimental para caucho de acuerdo a la norma ASTM D-4014 [1]. Esta norma determina el módulo de corte usando la curva fuerza-deformación a un nivel de 25% de deformación unitaria del caucho, tomado a un 50% de deformación máxima del caucho durante el ensayo. Asimismo, para determinar la variación del módulo de corte respecto de la deformación del caucho, el ensayo se llevó a cabo para diferentes niveles de deformación unitaria máxima del caucho (50, 100, 150 y 200%). [21]

4.1.2 Especímenes

Para el ensayo se utilizaron 3 especímenes (MC-01, MC-02, MC-03). Cada espécimen tiene 4 láminas de caucho sintético (neopreno) con un espesor de 10mm y una sección de 50mm x 50mm. Las láminas de caucho están unidas a unas placas de acero A36 de 5mm de espesor mediante un proceso de vulcanizado. La Figura N° 4.1 muestra una vista tridimensional del espécimen.

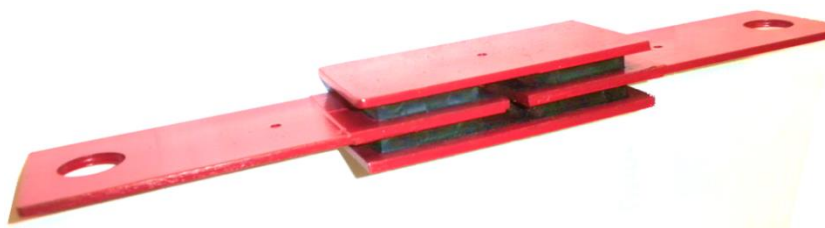


Figura N° 4.1 Vista tridimensional del espécimen
(Fuente: Reyna R., 2010)

La placa superior e inferior tiene 70mm x 150mm de sección y 5mm de espesor, además cuenta con un orificio de 5mm (3/16") de diámetro tal como se muestra en la Figura N° 4.2. La placa intermedia (ver Figura N° 4.3) tiene 70mm x 150mm

de sección y 5mm de espesor, además cuenta con 2 orificios, uno de 25.4mm (1") y otro de 5mm (3/16") de diámetro.

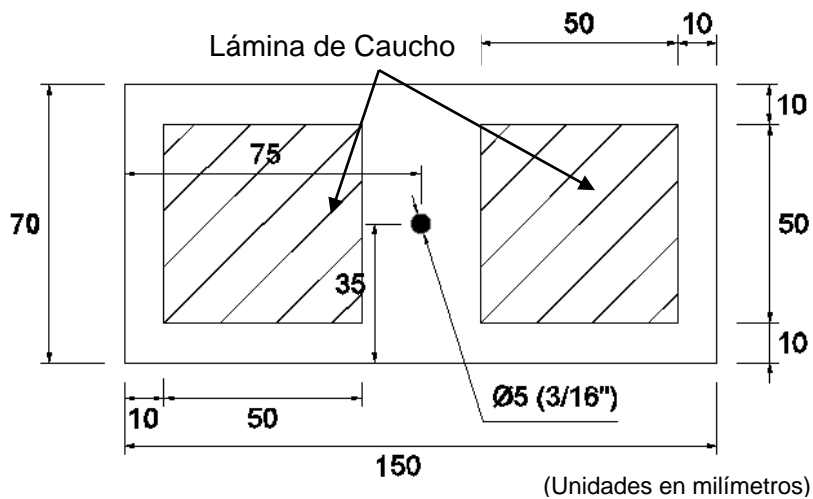


Figura N° 4.2 Placa superior e inferior
 (Fuente: Elaboración propia)

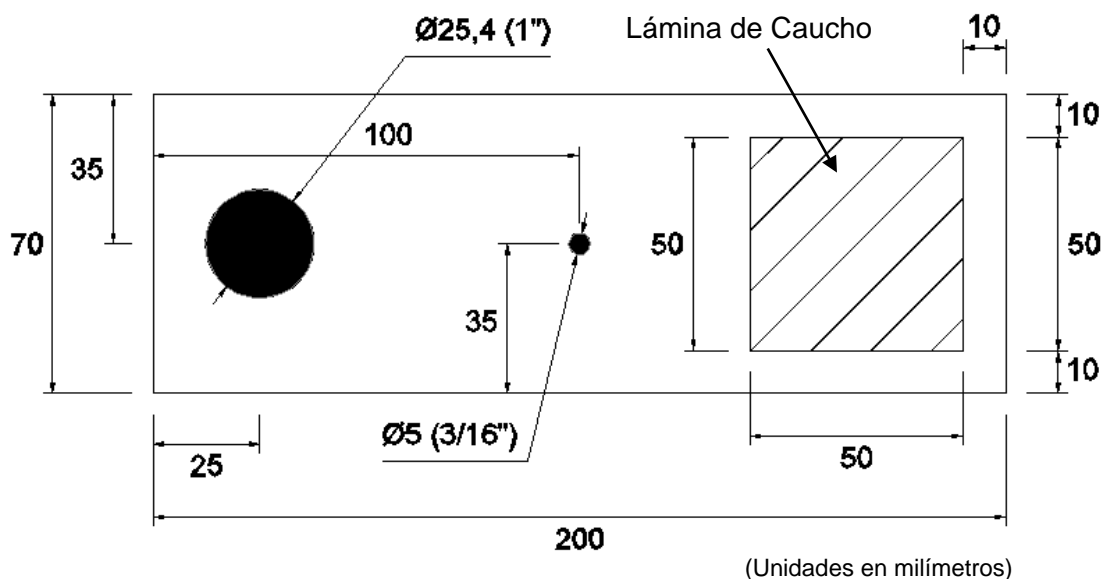


Figura N° 4.3 Placa intermedia
 (Fuente: Elaboración propia)

Las láminas de caucho están unidas mediante un proceso de vulcanizado a las placas de acero, además se encuentran simétricamente ubicadas, con igual distancia respecto del borde (10mm desde el borde de la placa hasta la lámina de caucho).

4.1.3 Procedimiento de Ensayo y Patrón de Deformaciones

De acuerdo a la norma ASTM D-4014, el espécimen a ser ensayado consiste en láminas de caucho vulcanizadas entre láminas de acero, tal como se detalló en el numeral 3.1.3. El espécimen está sujeto a 6 ciclos de tensión, llevando el espécimen a una deformación igual al espesor de la lámina de caucho. La deformación del espécimen corresponde a un 50% de la deformación de la lámina de caucho. El espécimen deberá estar anclado adecuadamente en un extremo y conectado en el otro extremo a una gata hidráulica la cual proveerá la fuerza necesaria para deformar el espécimen.

Debido a la necesidad de conocer el comportamiento del módulo de corte del caucho y el nivel de deformación del caucho, el patrón de deformaciones a ser usado en este ensayo queda definido por 8 ciclos de extensiones para diferentes niveles de deformación máxima del espécimen, correspondientes a: 50, 100, 150 y 200% de la deformación máxima de la lámina de caucho. El patrón de deformaciones se muestra en la Figura N° 4.4.

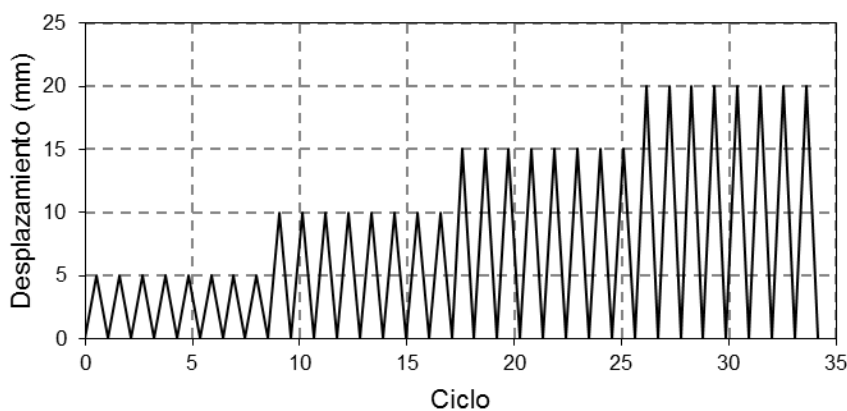


Figura N° 4.4 Patrón de deformaciones
(Fuente: Elaboración propia)

4.1.4 Sistema de Adquisición de Datos

El sistema de adquisición de datos a ser usados durante el ensayo cuenta con 5 canales, canal CH-00, correspondiente a la celda de carga, para cuantificar la carga aplicada al espécimen, canales CH-01 ~ CH-04, corresponden a transductores de desplazamiento (LVDT) para cuantificar las deformaciones del

espécimen. La Figura N° 4.5, muestra la disposición del equipo de adquisición de datos a ser usados durante el ensayo.

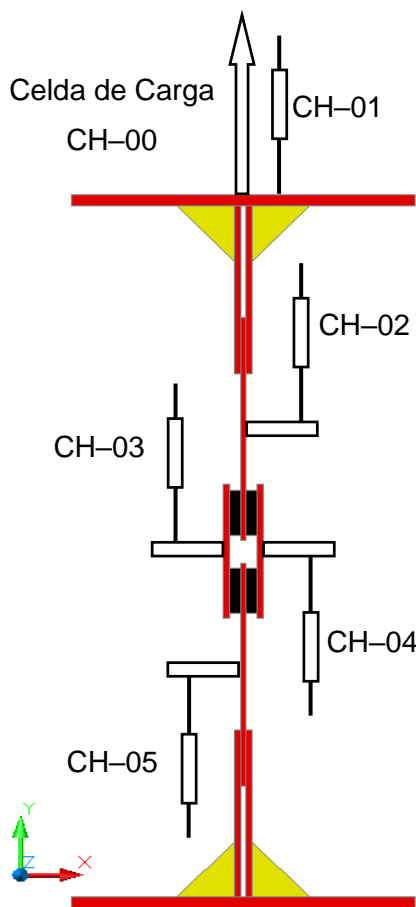


Figura N° 4.5 Sistema de adquisición de datos
 (Fuente: Elaboración propia)

El tipo y características de los dispositivos del sistema de adquisición de datos se muestran en la Tabla N° 4.1.

Tabla N° 4.1 Dispositivos de adquisición de datos

Canal	Dispositivo	Rango
CH-00	Celda de Carga	25 tf.
CH-01	LVDT	100 mm
CH-02	LVDT	50 mm
CH-03	LVDT	50 mm
CH-04	LVDT	50 mm
CH-05	LVDT	25 mm

LVDT: Linear Variable Differential Transformer

(Fuente: Elaboración propia)

4.1.5 Resultados Experimentales

Los especímenes fueron ensayados a diferentes niveles de deformación máxima, correspondientes a los canales CH-01 y CH-02, y una deformación máxima de la lámina de caucho, correspondiente a los canales CH-03 y CH-04, tal como se muestra en la Tabla N° 4.2.

Tabla N° 4.2 Deformación máxima del espécimen y de lámina de caucho

Deformación de Corte Máximo		
Especímen	Lámina de Caucho	
CH-01 & CH-02	CH-03 & CH-04	
(mm)	(mm)	(%)
10	5	50%
20	10	100%
30	15	150%
40	20	200%

(Fuente: Elaboración propia)

La Figura N° 4.6, correspondientes al espécimen MC-03, muestra la deformación de corte durante el ensayo a diferentes niveles de deformación de la lámina de caucho.

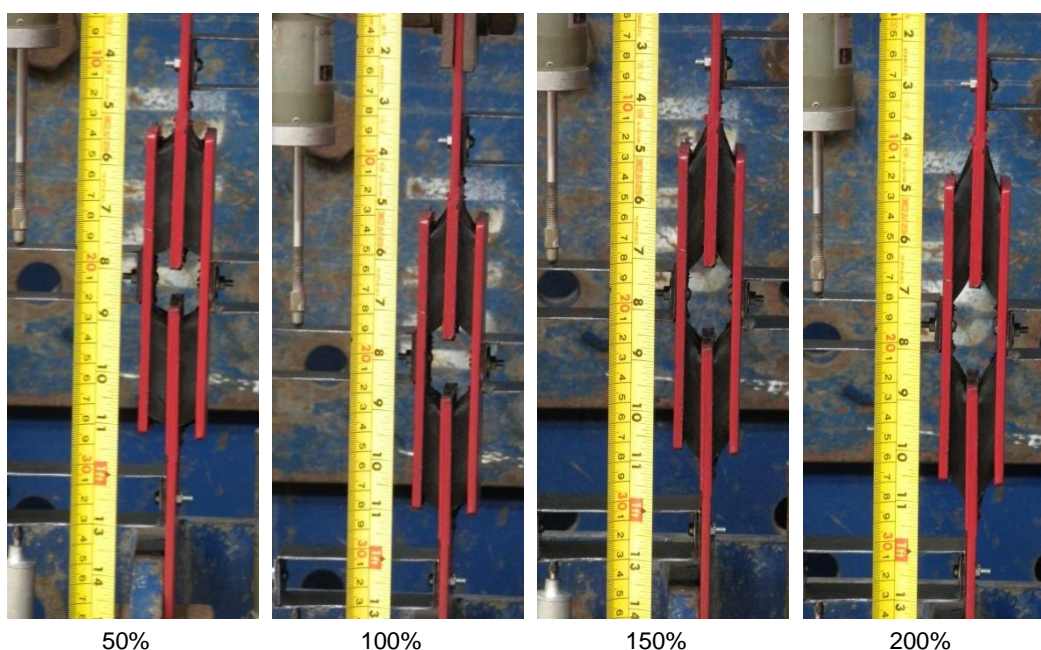


Figura N° 4.6 Especímen sujeto a diferentes niveles de deformación de corte
 (Fuente: Reyna R., 2010)

El patrón de deformación de los especímenes MC-01, MC-02 y MC-03, correspondiente al canal CH-02 se muestra en la Figura N° 4.7. Además, las curvas experimentales Fuerza vs. Desplazamiento de cada espécimen, tanto para la deformación global del espécimen (CH-01, CH-02) como para deformaciones de la lámina de caucho (CH-03, CH-04), se muestran en la Figura N° 4.8.

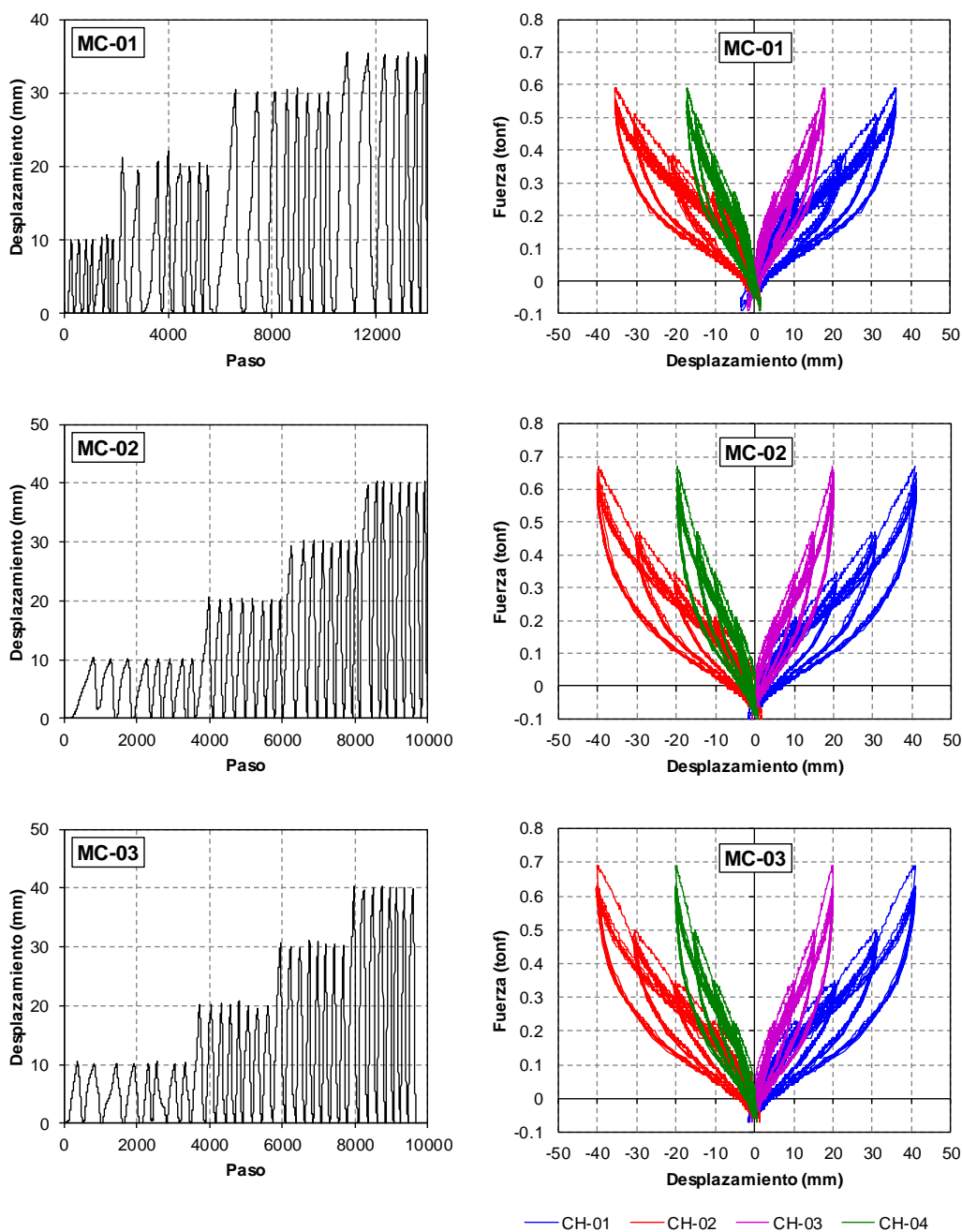


Figura N° 4.7 Patrón de deformación experimental
(Fuente: Elaboración propia)

Figura N° 4.8 Fuerza vs. Desplazamiento experimental
(Fuente: Elaboración propia)

4.1.6 Procesamiento de Datos Experimentales

El procesamiento de datos experimentales se lleva a cabo usando un algoritmo para evitar los saltos de los datos debido al ruido y a la sensibilidad de los equipos de medición usados. La Figura N° 4.9 muestra la comparación entre la data original registrada durante el ensayo y la data procesada después de su procesamiento, correspondiente al espécimen MC-03 a un 50% de deformación de la lámina de caucho.

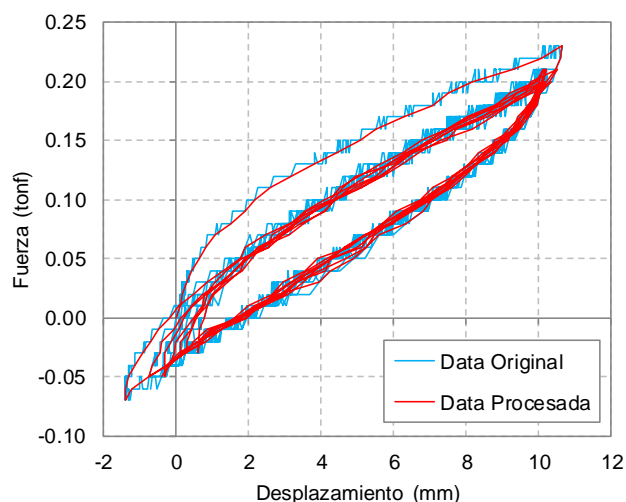


Figura N° 4.9 Data original y Data procesada
 (Fuente: Elaboración propia)

Las curvas experimentales de fuerza vs. desplazamiento, de los 3 especímenes, se muestran en la Figura N° 4.10. De los resultados experimentales se puede apreciar los valores máximos para la carga aplicada a cada espécimen y la correspondiente deformación máxima del mismo, tal como se puede apreciar en la Tabla N° 4.3.

Tabla N° 4.3 Carga máxima y desplazamiento máximo experimental

	Canal	Und.	MC-01	MC-02	MC-03
Carga Máxima	CH-00	tf	0.59	0.67	0.69
Desplazamiento Máximo (En valor absoluto)	CH-01	mm	36.2	41.15	41.00
	CH-02	mm	35.5	40.28	40.28
	CH-03	mm	17.95	20.05	20.05
	CH-04	mm	17.20	19.88	20.18

(Fuente: Elaboración propia)

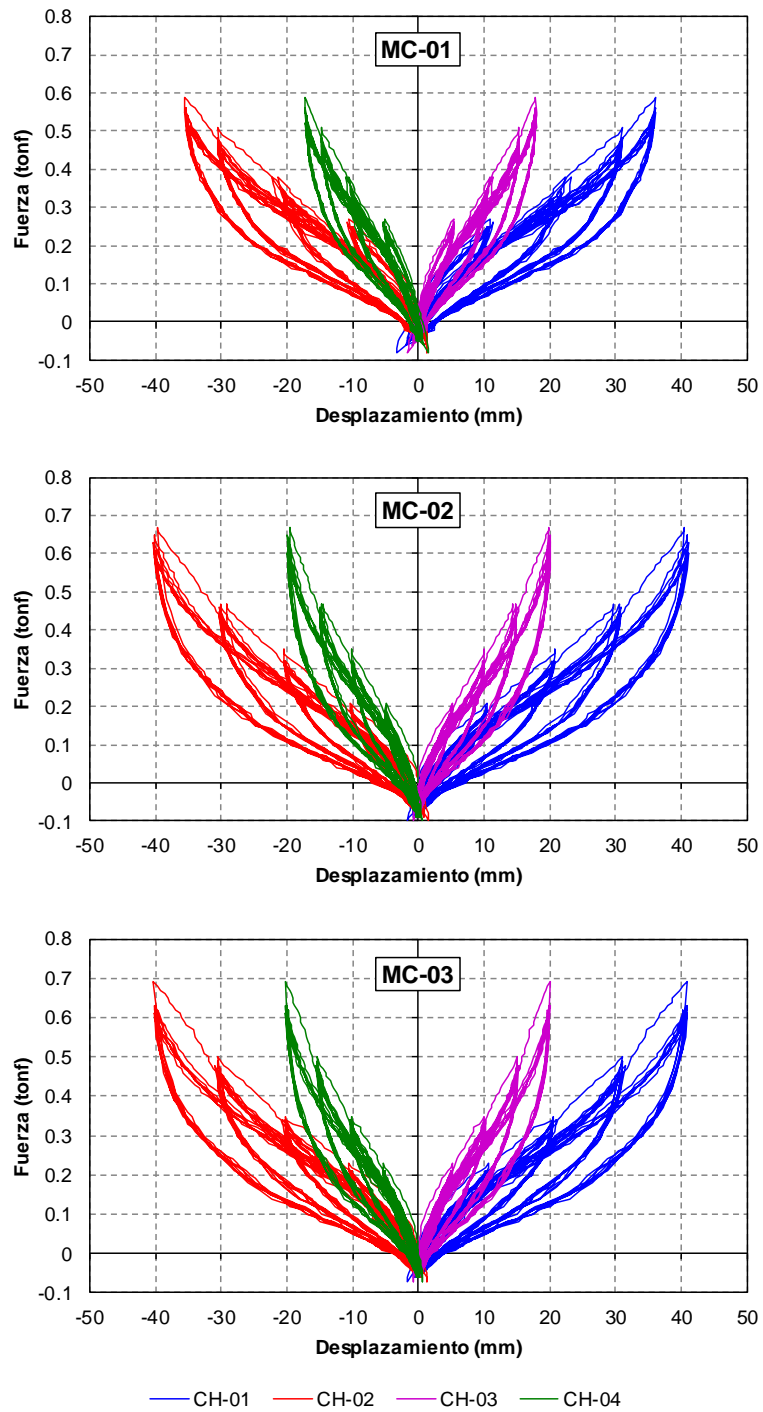


Figura N° 4.10 Curvas procesadas Fuerza vs. Desplazamiento
(Fuente: Elaboración propia)

4.2 ENSAYO DINÁMICO SOBRE UNA MESA VIBRADORA

4.2.1 Objetivo

Para estudiar el comportamiento dinámico de un sistema de aislamiento es importante conocer parámetros fundamentales como su periodo natural de vibración, rigidez lateral, así como su amortiguamiento inherente. Para ello, se llevó a cabo un ensayo sobre una mesa vibradora, de un espécimen a escala apoyado sobre un sistema de aislamiento a fin de determinar su periodo natural de vibración y su correspondiente rigidez lateral. [2]

4.2.2 Especímenes

El espécimen es una estructura de acero de tres pisos escalado 1/10, el cual consta de cuatro columnas de sección circular de 5/8" de diámetro, cuatro planchas de acero por entrepiso con un peso aproximado de 120kgf, una altura libre de entrepiso de 25cm y un espesor de entrepiso de 6cm. Además, la luz libre entre columnas en la dirección longitudinal es de 45cm y que en la dirección transversal de 15cm. El espécimen fue fijado a una mesa vibradora tal como se aprecia en la Figura N° 4.11, el cual corresponde al espécimen con base fija.



Figura N° 4.11 Especímen de tres pisos a escala 1/10 con base fija
(Fuente: Reyna R., 2013)

Por otro lado, el espécimen fue fijado a un sistema de aislamiento tal como se muestra en la Figura N° 4.12. El sistema de aislamiento usado consta de cuatro apoyos de sección cuadrada de 5cm x 5cm, dos capas de caucho de 1cm de

espesor, vulcanizado entre láminas de acero de 0.5cm de espesor, tal como se muestra en la Figura N° 4.13.

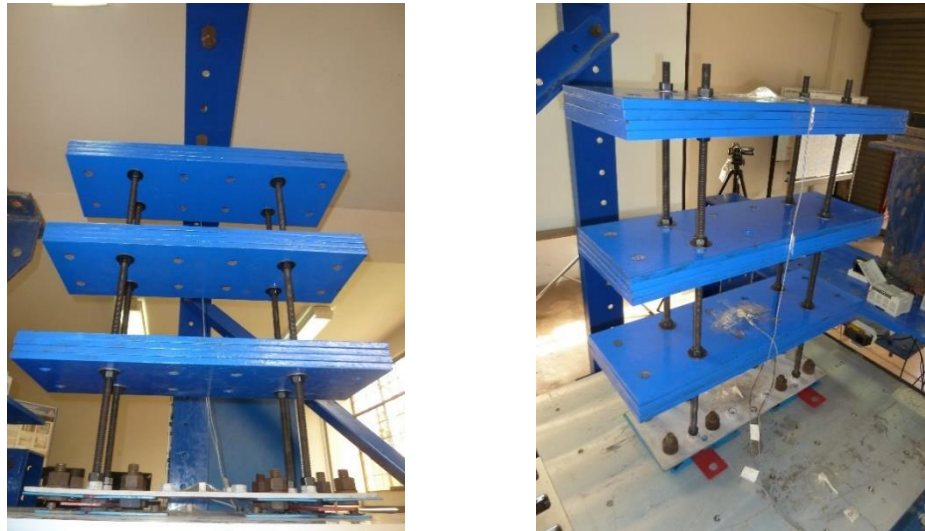


Figura N° 4.12 Espécimen de tres pisos a escala 1/10 con base aislada
 (Fuente: Reyna R., 2013)

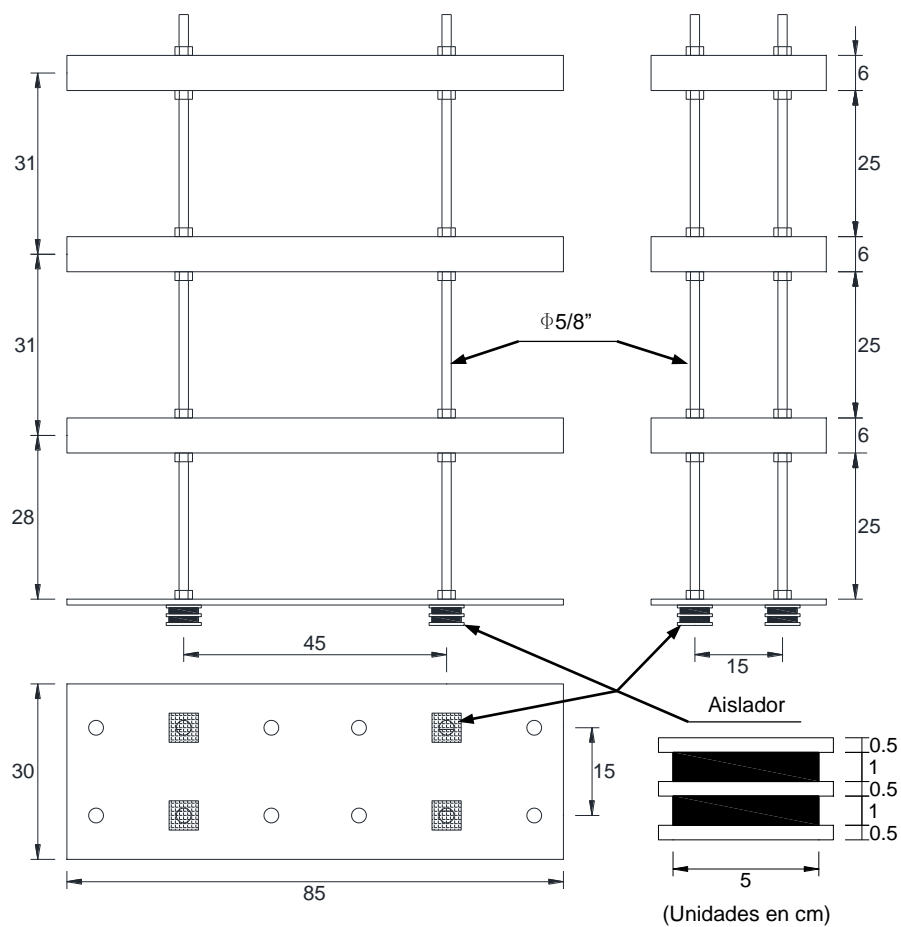


Figura N° 4.13 Detalles del espécimen de tres pisos y sistema de aislamiento
 (Fuente: Elaboración propia)

4.2.3 Procedimiento de Ensayo

El ensayo se llevó a cabo en dos etapas. Primero, a fin de determinar la frecuencia natural de vibración del espécimen con base fija y su amortiguamiento, se aplicó una onda sinusoidal con diferentes frecuencias de la mesa vibradora desde 1Hz hasta 12Hz con el espécimen con base fija.

Segundo, del mismo modo, para determinar la frecuencia natural de vibración del espécimen con base aislada y su amortiguamiento, se aplicó una onda sinusoidal con diferentes frecuencias de la mesa vibradora desde 1Hz y 30Hz con el espécimen con base aislada.

4.2.4 Sistema de Adquisición de Datos

Para la toma de datos experimentales, se usó un sistema de adquisición de datos de aceleraciones, mediante el uso de transductores de aceleración con un rango máximo de 5G (G: aceleración de la gravedad, g); y un sistema de adquisición de desplazamientos mediante el uso de transductores laser de desplazamiento con un rango de $\pm 10\text{mm}$. (ver Figura N° 4.14)

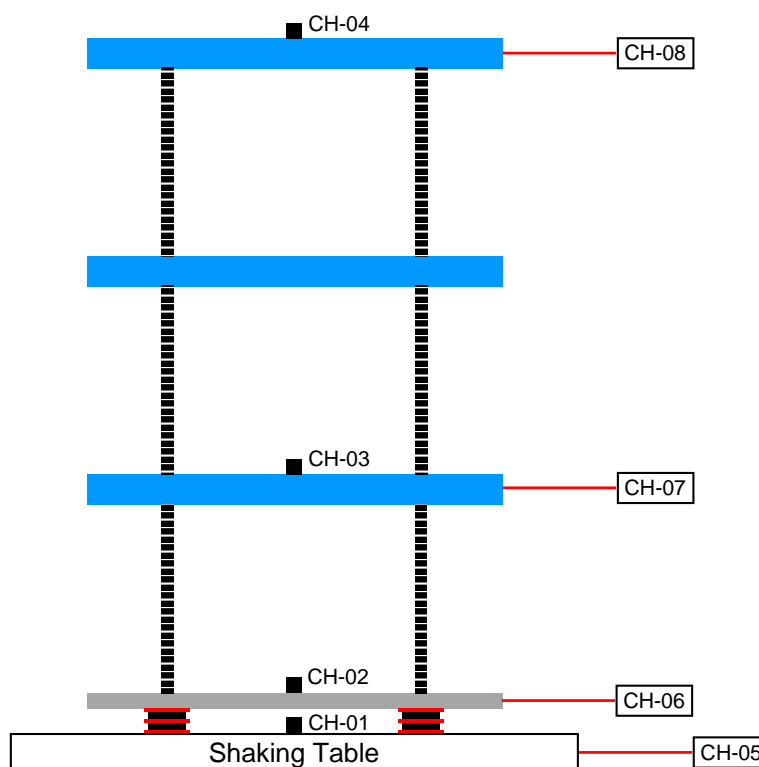


Figura N° 4.14 Sistema de adquisición de datos
 (Fuente: Elaboración propia)

El sistema de adquisición de datos para el espécimen con base aislada cuenta con 8 canales cuya distribución se aprecia en la Figura N° 4.14, de los cuales, los canales CH-01 ~ CH-04, corresponden a transductores de aceleración ubicados en la mesa vibradora, nivel del sistema de aislamiento, primer piso y tercer piso del espécimen. Asimismo, los canales CH-05 ~ CH-08, corresponden a los transductores laser de desplazamiento ubicados para medir los desplazamientos de la mesa vibradora, nivel de aislamiento, primer piso y tercer piso del espécimen, tal como se detalla en la Tabla N° 4.4. Para el espécimen con base fija, los canales CH-02 y CH-06 también corresponden a la aceleración y desplazamiento de la mesa vibradora respectivamente.

Tabla N° 4.4 Dispositivos de adquisición de datos

Canal	Ubicación	Tipo	Canal	Unidad	Rango
CH-01	Mesa Vibradora (ST)	Acc	CH-01	G	5G
CH-02	Base Aislada (BI)	Acc	CH-02	G	5G
CH-03	Primer Piso (1F)	Acc	CH-03	G	5G
CH-04	Tercer Piso (3F)	Acc	CH-04	G	5G
CH-05	Mesa Vibradora (ST)	Disp	CH-05	mm	±10mm
CH-06	Base Aislada (BI)	Disp	CH-06	mm	±10mm
CH-07	Primer Piso (1F)	Disp	CH-07	mm	±10mm
CH-08	Tercer Piso (3F)	Disp	CH-08	mm	±10mm

ST: Shaking Table (Mesa Vibradora), BI: Base Isolation (Aislamiento en la Base)

(Fuente: Elaboración propia)

4.2.5 Resultados Experimentales

El espécimen de base fija fue ensayado sobre la mesa vibradora, aplicando una onda sinusoidal con diferentes niveles de frecuencia desde 1Hz hasta 15Hz. La Figura N° 4.15 muestra los datos de aceleración adquirida correspondiente a los canales CH-01(ST), CH-03(1F) y CH-4(3F), así como también de desplazamiento correspondiente a los canales CH-05(ST), CH-07(1F) y CH-8(3F). Los datos mostrados corresponden a una frecuencia de vibración de la mesa vibradora de 8Hz.

Del mismo modo, el espécimen de base aislada fue ensayado sobre la mesa vibradora, aplicando una onda sinusoidal con diferentes niveles de frecuencia desde 1Hz hasta 30Hz. La Figura N° 4.16 muestra los datos de aceleración adquirida correspondiente a los canales CH-01(ST), CH-02(BI), CH-03(1F) y CH-

4(3F), así como también de desplazamiento correspondiente a los canales CH-05(ST), CH-06(BI), CH-07(1F) y CH-8(3F). Los datos mostrados corresponden a una frecuencia de vibración de la mesa vibradora de 5Hz.

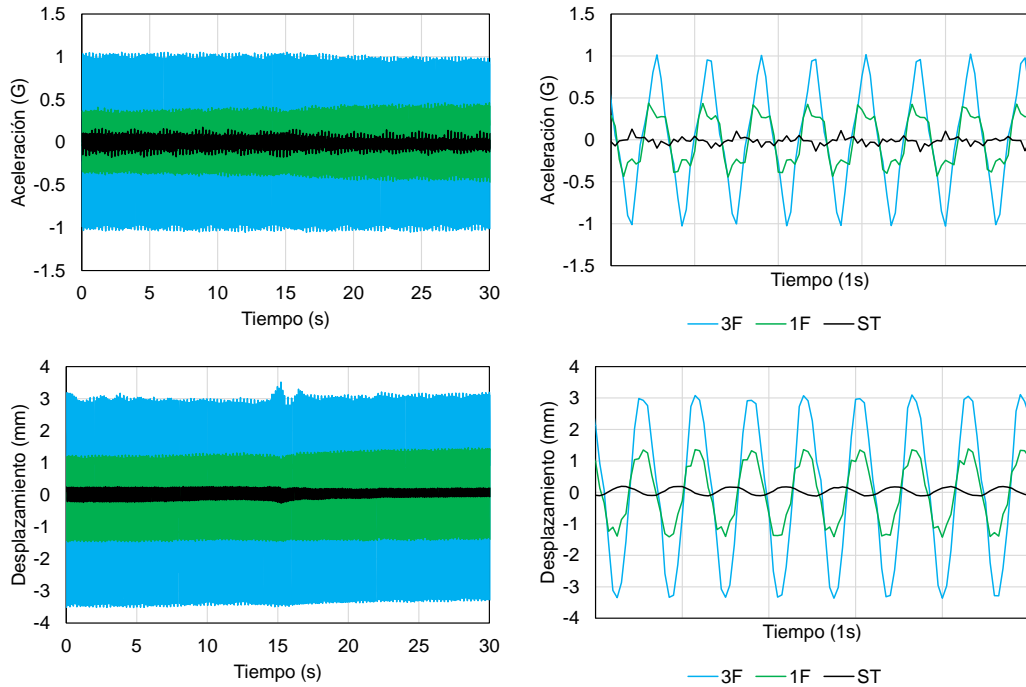


Figura N° 4.15 Registro de aceleración y desplazamiento con base fija
 (Fuente: Elaboración propia)

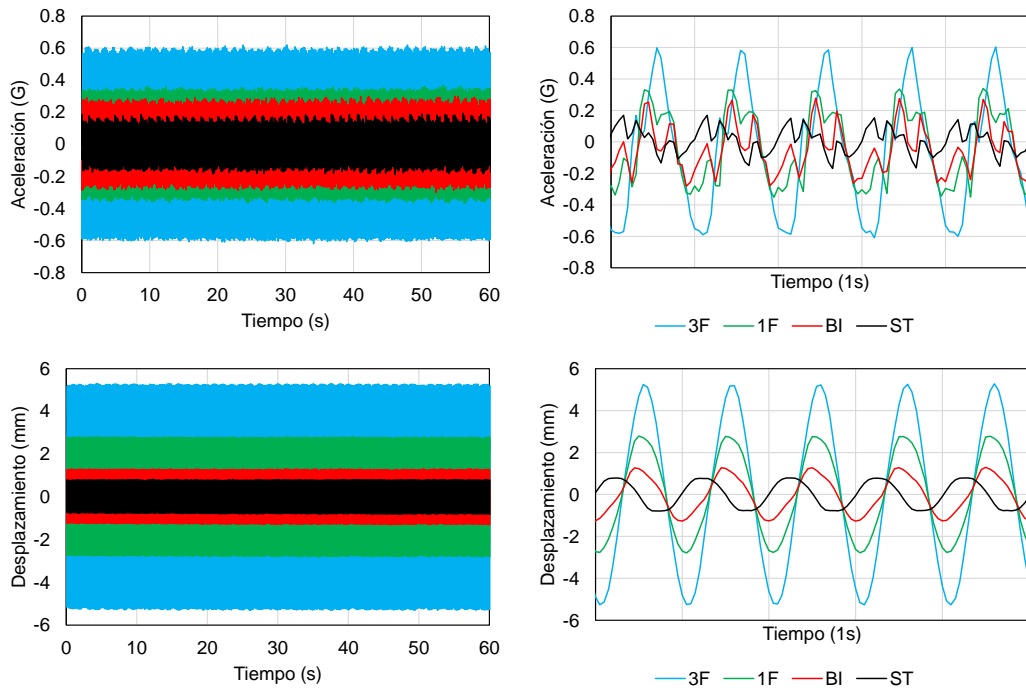


Figura N° 4.16 Registro de aceleración y desplazamiento con base aislada
 (Fuente: Elaboración propia)

4.2.6 Procesamiento de Datos Experimentales

Del análisis de datos correspondiente al espécimen con base fija bajo una vibración forzada, se presenta el resumen de frecuencias de vibración aplicadas y su correspondiente razón de amplitud tal como se muestra en la Figura N° 4.17 y se detallada en la Tabla N° 4.5. Donde ρ_3 y ρ_1 corresponden a la razón de la amplitud de desplazamiento del tercer nivel respecto al desplazamiento de la mesa vibradora, y a la razón de la amplitud del primer nivel respecto al desplazamiento de la mesa vibradora respectivamente.

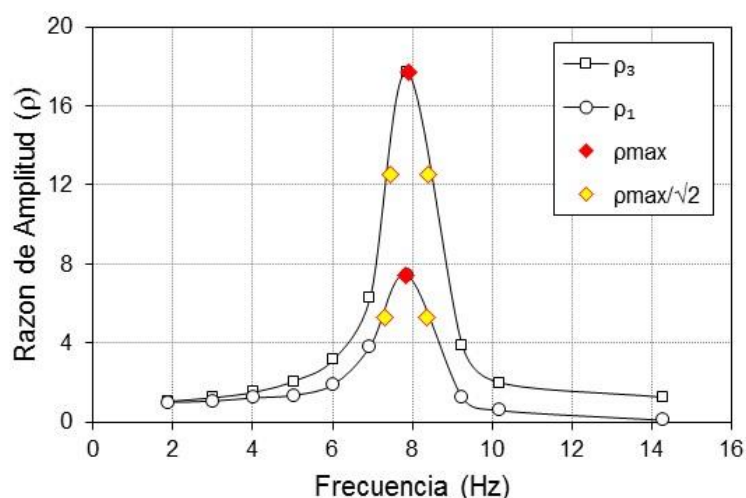


Figura N° 4.17 Vibración forzada de espécimen con base fija
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla N° 4.5 Resultados procesados para espécimen con base fija

f (Hz)	T (seg)	A_{ST} (mm)	A_{1F} (mm)	A_{3F} (mm)	ρ_1	ρ_3
1.887	0.530	9.622	9.648	10.071	1.003	1.047
2.985	0.335	5.955	6.328	7.306	1.063	1.227
4.016	0.249	4.141	5.07	6.23	1.224	1.504
5.025	0.199	2.866	3.892	5.925	1.358	2.067
6.024	0.166	1.653	3.149	5.223	1.905	3.160
6.944	0.144	0.703	2.686	4.414	3.821	6.279
7.874	0.127	0.181	1.347	3.207	7.442	17.718
9.259	0.108	0.72	0.893	2.78	1.240	3.861
10.204	0.098	1.044	0.612	2.08	0.586	1.992
14.286	0.070	1.103	0.101	1.387	0.092	1.257

(Fuente: Elaboración propia)

De la Figura N° 4.17, se obtuvo una frecuencia natural de vibración de 7.838Hz el cual corresponde a un periodo fundamental de vibración del espécimen con base fija de 0.128seg y un amortiguamiento de 6.68%, para la razón de amplitud del primer nivel respecto del movimiento de la mesa vibradora (ρ_1), y una frecuencia natural de vibración de 7.923Hz el cual corresponde a un periodo fundamental de vibración del espécimen con base fija de 0.126seg y un amortiguamiento de 5.94%, para la razón de amplitud del tercer nivel respecto del movimiento de la mesa vibradora (ρ_3), tal como se detalla en la Tabla N° 4.6.

Tabla N° 4.6 Resultados procesados para espécimen con base fija

ρ_i	ρ_{max}	$\rho_{max}/\sqrt{2}$	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f (Hz)	T (seg)	h (%)
ρ_1	7.442	5.262	7.314	8.361	7.838	0.128	6.68
ρ_3	17.718	12.529	7.452	8.393	7.923	0.126	5.94

(Fuente: Elaboración propia)

Del mismo modo, del análisis de datos correspondiente al espécimen con base aislada bajo una vibración forzada, se presenta el resumen de frecuencias de vibración aplicadas y su correspondiente razón de amplitud tal como se muestra en la Figura N° 4.18 y se detalla en la Tabla N° 4.7. Asimismo, se puede observar claramente dos modos de vibración del espécimen con base aislada, correspondiente al primer y segundo modo de vibración del espécimen sujeto al barrido de frecuencias durante el ensayo.

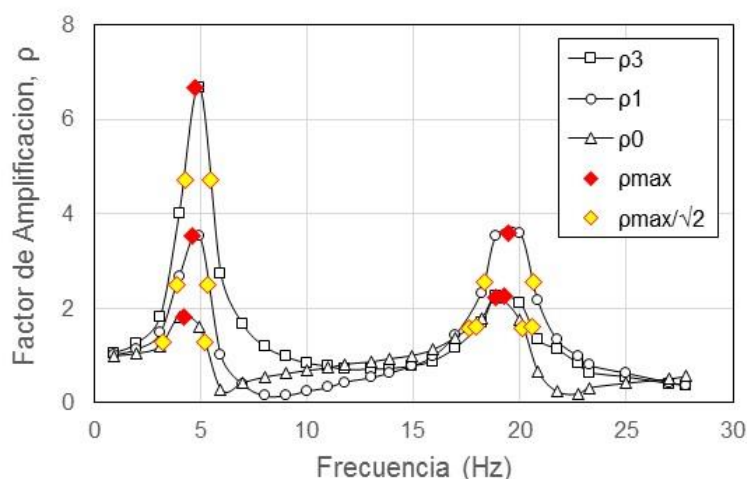


Figura N° 4.18 Vibración forzada de espécimen con base aislada

(Fuente: Elaboración propia)

Donde ρ_3 , ρ_1 y ρ_0 corresponden a la razón de la amplitud de desplazamiento del tercer nivel respecto al desplazamiento de la mesa vibradora, razón de la amplitud del primer nivel respecto al desplazamiento de la mesa vibradora, y a la razón de la amplitud del nivel de la base aislada respecto al desplazamiento de la mesa vibradora respectivamente.

Tabla N° 4.7 Resultados procesados para espécimen con base aislada

f (Hz)	T (seg)	A _{ST} (mm)	A _{BI} (mm)	A _{1F} (mm)	A _{3F} (mm)	ρ_0	ρ_1	ρ_3
0.93	1.07	15.363	15.297	15.512	16.091	0.996	1.010	1.047
2.01	0.498	6.883	7.209	7.81	8.712	1.047	1.135	1.266
3.10	0.323	3.99	4.785	5.89	7.291	1.199	1.476	1.827
3.98	0.251	1.967	3.583	5.25	7.855	1.822	2.669	3.993
4.95	0.202	0.785	1.271	2.77	5.242	1.619	3.529	6.678
5.95	0.168	1.15	0.328	1.156	3.136	0.285	1.005	2.727
6.99	0.143	1.183	0.508	0.453	1.961	0.429	0.383	1.658
8.00	0.125	1.141	0.622	0.165	1.361	0.545	0.145	1.193
9.01	0.111	1.044	0.645	0.155	1.014	0.618	0.148	0.971
10.00	0.1	0.958	0.656	0.234	0.806	0.685	0.244	0.841
10.99	0.091	0.863	0.638	0.277	0.666	0.739	0.321	0.772
11.76	0.085	0.777	0.634	0.34	0.549	0.816	0.438	0.707
12.99	0.077	0.683	0.592	0.36	0.485	0.867	0.527	0.710
13.89	0.072	0.565	0.527	0.359	0.411	0.933	0.635	0.727
14.93	0.067	0.481	0.481	0.372	0.375	1.000	0.773	0.780
15.87	0.063	0.398	0.446	0.387	0.351	1.121	0.972	0.882
16.95	0.059	0.291	0.401	0.415	0.338	1.378	1.426	1.162
18.18	0.055	0.192	0.344	0.448	0.324	1.792	2.333	1.688
18.87	0.053	0.119	0.266	0.419	0.269	2.235	3.521	2.261
20.00	0.05	0.11	0.192	0.396	0.231	1.745	3.600	2.100
20.83	0.048	0.141	0.095	0.305	0.19	0.674	2.163	1.348
21.74	0.046	0.152	0.036	0.202	0.173	0.237	1.329	1.138
22.73	0.044	0.154	0.029	0.152	0.127	0.188	0.987	0.825
23.26	0.043	0.146	0.046	0.116	0.094	0.315	0.795	0.644
25.00	0.04	0.135	0.056	0.084	0.074	0.415	0.622	0.548
27.03	0.037	0.091	0.046	0.039	0.037	0.505	0.429	0.407
27.78	0.036	15.363	15.297	15.512	16.091	0.558	0.364	0.377

(Fuente: Elaboración propia)

De la Figura N° 4.18, para el primer modo de vibración, se obtuvo una frecuencia natural de vibración de 4.211Hz el cual corresponde a un periodo fundamental de vibración del espécimen con base aislada de 0.237seg y un amortiguamiento de

23.47%, para la razón de amplitud del nivel de aislamiento respecto del movimiento de la mesa vibradora (ρ_0), una frecuencia natural de vibración de 4.608Hz el cual corresponde a un periodo fundamental de vibración del espécimen con base aislada de 0.217seg y un amortiguamiento de 16.34%, para la razón de amplitud del primer nivel respecto del movimiento de la mesa vibradora (ρ_1), y una frecuencia natural de vibración de 4.722Hz el cual corresponde a un periodo fundamental de vibración del espécimen con base aislada de 0.212seg y un amortiguamiento de 12.71%, para la razón de amplitud del tercer nivel respecto del movimiento de la mesa vibradora (ρ_3).

Del mismo modo, para el segundo modo de vibración, se obtuvo una frecuencia de vibración de 20.114Hz el cual corresponde a un periodo de vibración del espécimen con base aislada de 0.053seg y un amortiguamiento de 6.65%, para la razón de amplitud del nivel de aislamiento respecto del movimiento de la mesa vibradora (ρ_0), una frecuencia de vibración de 20.612Hz el cual corresponde a un periodo de vibración del espécimen con base aislada de 0.051seg y un amortiguamiento de 5.93%, para la razón de amplitud del primer nivel respecto del movimiento de la mesa vibradora (ρ_1), y una frecuencia de vibración de 20.555Hz el cual corresponde a un periodo de vibración del espécimen con base aislada de 0.052seg y un amortiguamiento de 7.70%, para la razón de amplitud del tercer nivel respecto del movimiento de la mesa vibradora (ρ_3) tal como se detalla en la Tabla N° 4.8.

Tabla N° 4.8 Resultados procesados para espécimen con base aislada

Modo	ρ_i	ρ_{max}	$\rho_{max}/\sqrt{2}$	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f (Hz)	T (seg)	h (%)
1	ρ_0	1.822	1.288	3.223	5.199	4.211	0.237	23.47
	ρ_1	3.529	2.495	3.855	5.361	4.608	0.217	16.34
	ρ_3	6.678	4.722	4.246	5.446	4.722	0.212	12.71
2	ρ_0	2.235	1.581	17.606	20.114	18.860	0.053	6.65
	ρ_1	3.600	2.546	18.304	20.612	19.458	0.051	5.93
	ρ_3	2.261	1.598	17.973	20.555	19.264	0.052	6.70

(Fuente: Elaboración propia)

De los datos procesados, tanto para el espécimen con base fija como de base aislada, se consideró la razón de amplitudes correspondientes al último nivel para determinar el periodo y factor de amortiguamiento, de ambos especímenes; obteniendo un periodo natural de 0.126s y factor de amortiguamiento de 6.68%

para el espécimen con base fija, mientras que para el espécimen con base aislada se obtuvo un periodo natural de 0.212s y factor de amortiguamiento de 12.71%. Estos valores representan un 68.3% de incremento en el periodo del espécimen con base aislada respecto del espécimen con base fija, mientras que, en términos del factor de amortiguamiento, representa un 90.3% de incremento en el espécimen con base aislada respecto del espécimen con base fija. (ver Tabla N° 4.9)

Tabla N° 4.9 Comparación de parámetros dinámicos

Espécimen	T (seg)	h (%)
Con Base Fija	0.126	6.68%
Con Base Aislada	0.212	12.71%
Incremento (%)	68.3%	90.3%

(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 MÓDULO DE CORTE DE CAUCHO

5.1.1 Procedimiento de Cálculo según ASTM D-4014

El módulo de corte se obtiene de la curva fuerza vs desplazamiento del espécimen, de acuerdo con la norma ASTM D-4014. Donde F_1 corresponde al 2% de la carga máxima aplicada F_{max} , X_1 es el desplazamiento correspondiente para fuerza F_1 , X_2 corresponde al 25% de deformación de la lámina de caucho, F_2 es la fuerza correspondiente al desplazamiento X_2 . El área, A , corresponde al promedio del área de las secciones de las láminas de caucho de los especímenes. (ver Figura N° 5.1)

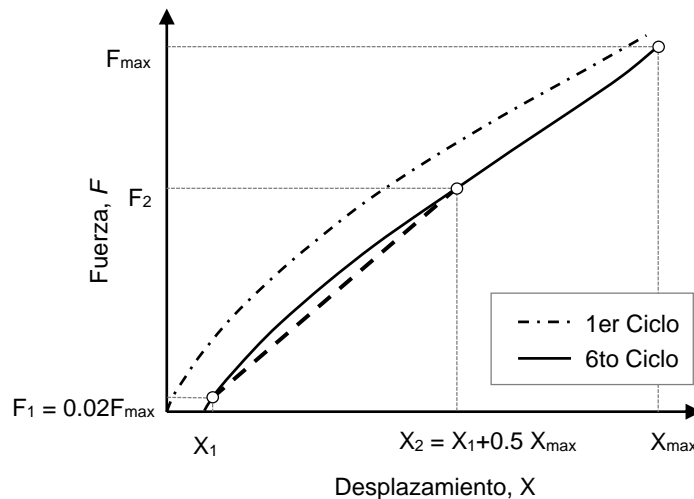


Figura N° 5.1 Módulo de corte de acuerdo a ASTM D-4014
 (Fuente: Elaboración propia)

El esfuerzo (σ) y la deformación unitaria (ε) correspondiente a un 25% de la deformación de la lámina de caucho, se define de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{F}{2A} = \frac{F_2 - F_1}{2A} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \frac{X}{2X_{max}} = \frac{X_2 - X_1}{2X_{max}} \quad (5.2)$$

De esta manera, el Módulo de Corte (G) puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\sigma = G\varepsilon$$

$$G = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F_2 - F_1}{2A}}{\frac{X_2 - X_1}{2X_{max}}} = \frac{(F_2 - F_1)X_{max}}{(X_2 - X_1)A}$$

$$G = \frac{(F_2 - F_1)X_{max}}{(X_1 - \frac{X_{max}}{2} - X_1)A} = \frac{(F_2 - F_1)X_{max}}{(\frac{X_{max}}{2})A}$$

$$G = \frac{2(F_2 - F_1)}{A} \quad (5.3)$$

5.1.2 Módulo de Corte Experimental

De acuerdo a la norma ASTM D-4014, a un nivel de deformación del espécimen del 50% (10mm de extensión de la gata hidráulica), equivalente al 25% de deformación de la lámina de caucho, se calcula el Módulo de Corte (G) para cada espécimen (MC-01, MC-02 y MC-03), en cada lazo de la curva histerética ensayada, tal como se muestra en la Figura N° 5.2.

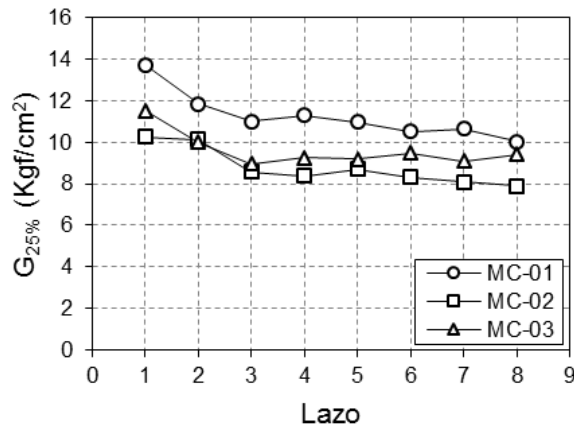


Figura N° 5.2 Módulo de corte al 25% de la deformación
 (Fuente: Elaboración propia)

De los resultados experimentales, a un nivel de deformación de la lámina de caucho de 25%, el Módulo de corte promedio del caucho es:

$$G_{25\%} = G_0 = 8.96 \text{ kgf/cm}^2 = 0.879 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

La relación entre el módulo de corte y la deformación de corte del caucho al 25% de deformación de la lámina de caucho, en la cual, al incrementar el número de lazos a un mismo nivel de deformación máxima, se observa la degradación del módulo de caucho. Así mismo, para los demás niveles de deformación máxima de la lámina de caucho al cual fueron sujetos los especímenes, se obtuvo el módulo de corte experimental del caucho para 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150% y 175%, tal como se aprecia en la Figura N° 5.3.

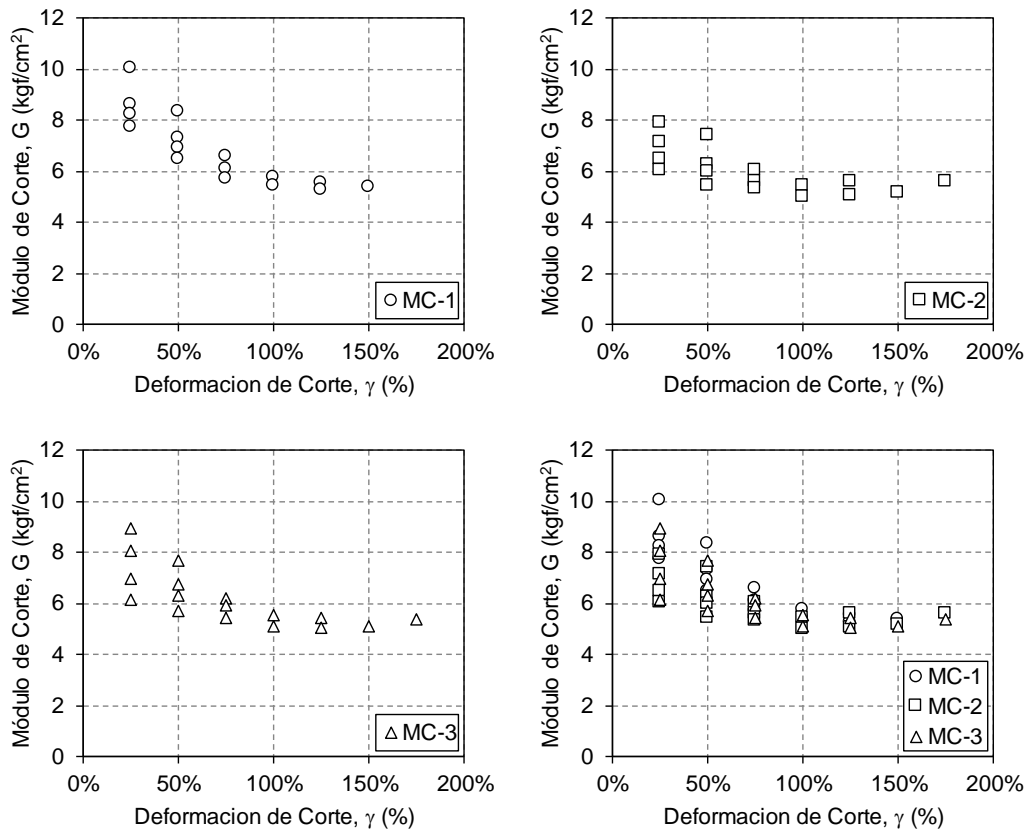


Figura N° 5.3 Módulo de corte vs. Deformación de corte
 (Fuente: Elaboración propia)

Tomando en consideración el módulo de corte experimental de la lámina de caucho para diferentes niveles de deformación, se observa la degradación del módulo de corte tal como se aprecia en la Figura N° 5.3. Considerando los valores promedios del módulo de corte para cada nivel de deformación de la lámina de caucho, la Figura N° 5.4 muestra la línea de tendencia correspondiente a la siguiente ecuación:

$$G_{(\gamma)} = -0.1\gamma^3 + 2.3\gamma^2 - 5.7\gamma + G_0 \quad (5.5)$$

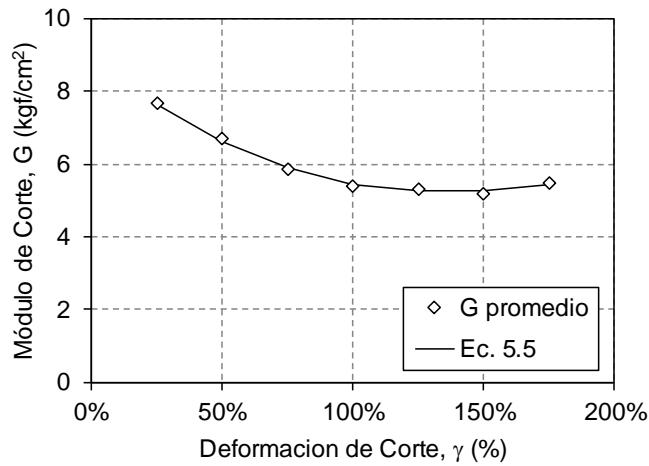


Figura N° 5.4 Tendencia de la degradación del módulo de corte promedio
 (Fuente: Elaboración propia)

Adicionalmente, uno de los especímenes (MC-01) fue ensayado hasta la rotura, la cual ocurrió alrededor del 300% de la deformación de corte del caucho. De los datos experimentales analizados correspondiente al espécimen ensayado hasta la rotura, se obtuvieron los valores del módulo de corte correspondiente al 200%, 225%, 250%, 275% y 300% de la deformación de corte de la lámina de caucho. En conjunto a los valores promedios del módulo de corte calculado previamente, tal como muestra la Figura N° 5.5, se presenta la línea de tendencia correspondiente a la siguiente ecuación:

$$G_{(\gamma)} = -0.32\gamma^3 + 2.88\gamma^2 - 6.06\gamma + G_0 \quad (5.6)$$

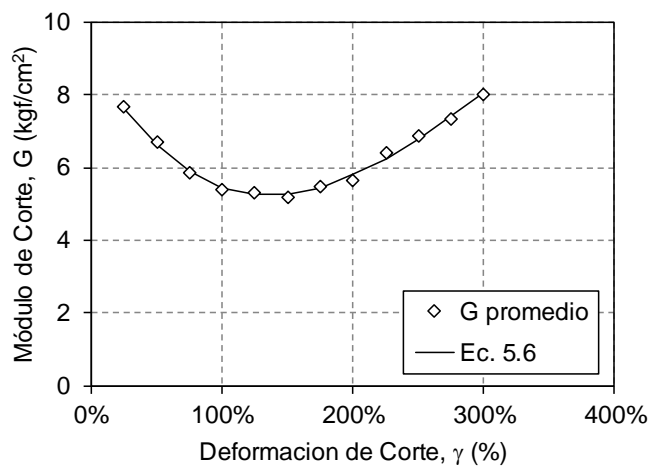


Figura N° 5.5 Tendencia de la degradación del módulo de corte promedio
 (Fuente: Elaboración propia)

5.1.3 Amortiguamiento Equivalente Experimental

En concordancia con lo mencionado en la Sección 3.5, la Ecuación (3.48) define el amortiguamiento equivalente de un lazo histerético correspondiente al modelo de comportamiento bilineal. Para un lazo histerético experimental, el amortiguamiento equivalente es directamente proporcional a la energía liberada por el ciclo histerético, cabe decir, al área encerrada por el lazo histerético experimental. El amortiguamiento efectivo experimental, se expresa de la siguiente manera:

$$h_{eq} = \frac{\text{Área del Lazo Histerético}}{2\pi K_{eq} D_{max}^2} \quad (5.7)$$

De los datos lazos histeréticos obtenidos experimentalmente, se obtiene el amortiguamiento equivalente experimental por lazo histerético para cada espécimen ensayado, tal como se aprecia en la Figura N° 5.6.

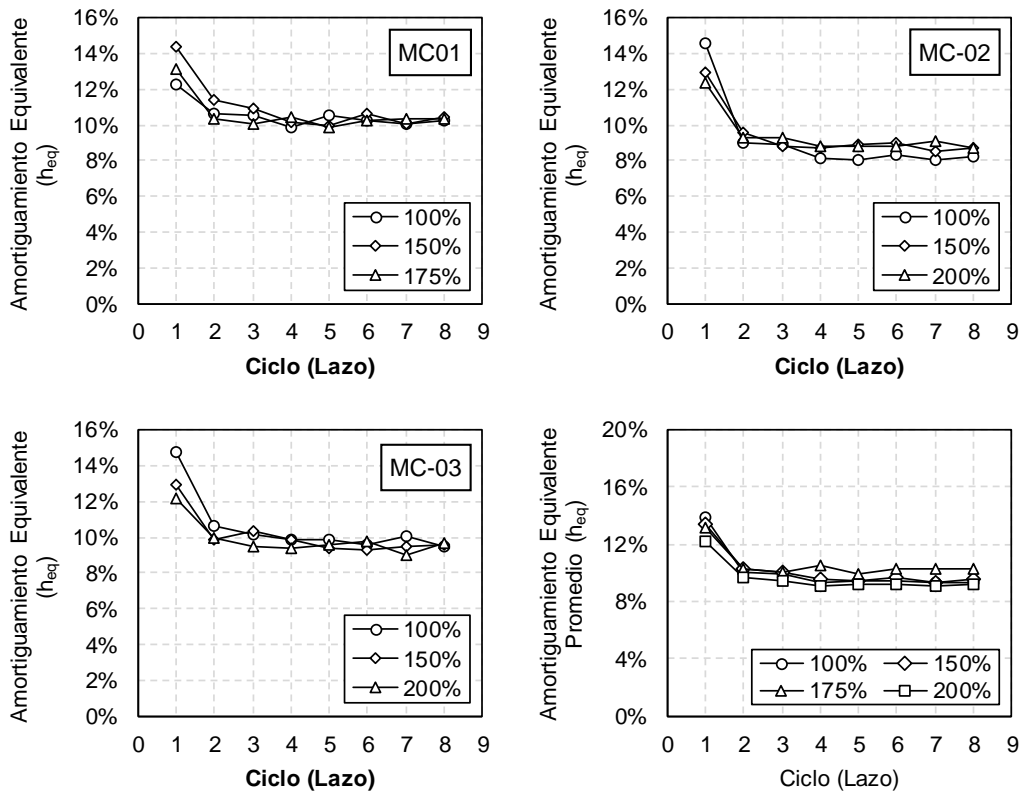


Figura N° 5.6 Amortiguamiento efectivo por ciclo de cada espécimen
 (Fuente: Elaboración propia)

Asimismo, se observa, como el amortiguamiento equivalente experimental se estabiliza; dichos valores estabilizados son presentados en la Figura N° 5.7, de los cuales se obtiene el amortiguamiento equivalente promedio mostrado a continuación:

$$h_{eq\ prom} = 9.23 \% \quad (5.8)$$

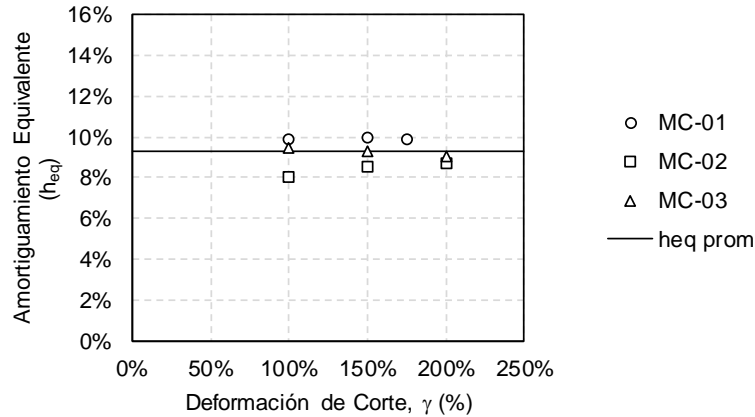
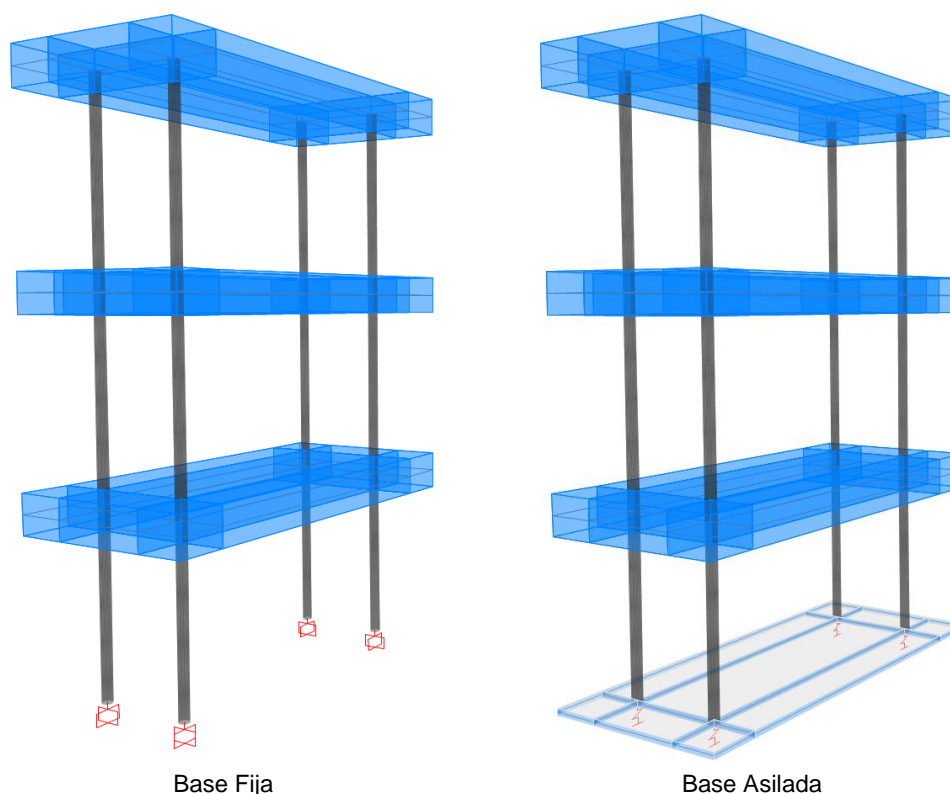


Figura N° 5.7 Amortiguamiento efectivo vs Deformación de corte
 (Fuente: Elaboración propia)

5.2 PERIODO Y MODOS DE VIBRACIÓN

Para el cálculo teórico de la rigidez inicial y amortiguamiento inherente de un sistema de aislamiento, tal como se mostró en la Sección 4.2, correspondiente al ensayo dinámico sobre mesa vibradora, se realizó un modelo numérico del espécimen ensayado usando un software comercial (SAP2000) [23], así como también el programa MDOF-BI (Multi Degree Of Freedom with Base Isolation, codificado por el Prof. Taiki Saito y modificado por el autor).

La Figura N° 5.8 muestra el modelo con base fija y con base aislada usando el software SAP2000, en el cual se utilizaron elementos tipo “Frame” para modelar las columnas de acero de sección circular con diámetro 5/8”, elementos tipo “Shell” para modelar los entrepisos con un espesor de 6cm y carga muerta equivalente a 120kgf, y elementos tipo “Link” para modelar el sistema de aislamiento. Adicionalmente se proporcionó brazos rígidos a las columnas en los entrepisos.



Base Fija

Base Asilada

Figura N° 5.8 Modelo 3D con base fija y con base aislada
(Fuente: Elaboración propia, Sap2000 v.15)

Para el análisis numérico realizado con el programa MDOF-BI, se usaron las características mostradas en la Tabla N° 5.1, correspondientes al peso y rigidez por nivel del espécimen. De los datos experimentales procesados, tanto para el espécimen con base fija como de base aislada, considerando la razón de amplitudes correspondientes al último nivel para determinar el periodo de ambos especímenes; obteniendo un periodo natural de 0.126s para el espécimen con base fija, mientras que para el espécimen con base aislada se obtuvo un periodo natural de 0.212s. Estos valores representan un 68.3% de incremento en el periodo del espécimen con base aislada respecto del espécimen con base fija.

Tabla N° 5.1 Peso y rigidez del espécimen

Nivel	W (tonf)	K (tonf/cm)
3F	0.127	1.36
2F	0.127	1.36
1F	0.127	1.36
BI	0.014	0.45

(Fuente: Elaboración propia)

Los valores de periodos teóricos calculados usando el programa SAP2000 y MDOF-BI se muestran en la Tabla N° 5.2, obteniendo un menor error usando el programa MDOF-BI.

Tabla N° 5.2 Periodos teóricos

Espécimen	Modo	Periodo Experimental (seg)	SAP2000		MDOF-BI	
			Periodo (seg)	Error	Periodo (seg)	Error
Con Base	1	0.212	0.249	17.90%	0.230	8.60%
Aislada	2	0.052	0.038	26.97%	0.058	11.73%
Con Base Fija	1	0.126	0.115	9.88%	0.136	6.25%

(Fuente: Elaboración propia)

De los resultados obtenidos en el análisis numérico, la Figura N° 5.9 muestra los modos de vibración del modelo, normalizados en el nivel de aislamiento. Tal como se muestra, el primer modo de vibración muestra la predominante distorsión en el nivel de aislamiento (el nivel de piso cero corresponde al nivel de aislamiento), respecto de las distorsiones de entrepiso de los niveles superiores.

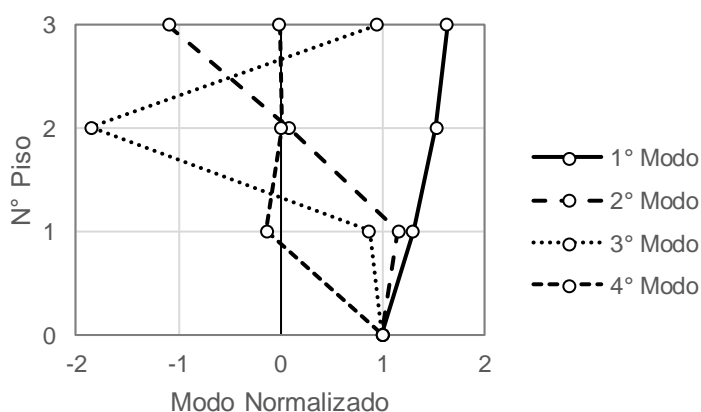


Figura N° 5.9 Modos normalizados

(Fuente: Elaboración propia)

5.3 HISTÉRESIS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

De los registros obtenidos del ensayo dinámico sobre una mesa vibradora del espécimen con base aislada, la Figura N° 5.10 presenta las curvas de histéresis en términos de fuerza cortante en el nivel de aislamiento versus el desplazamiento relativo del nivel de aislamiento. Se tomaron en cuenta los resultados obtenidos entre 4Hz y 10Hz de frecuencia de vibración de la mesa vibradora aproximadamente, debido a la cercanía de estos con la frecuencia

natural de vibración del espécimen con base aislada. Asimismo, se presenta la curva histerética promedio obtenida a partir de los resultados experimentales.

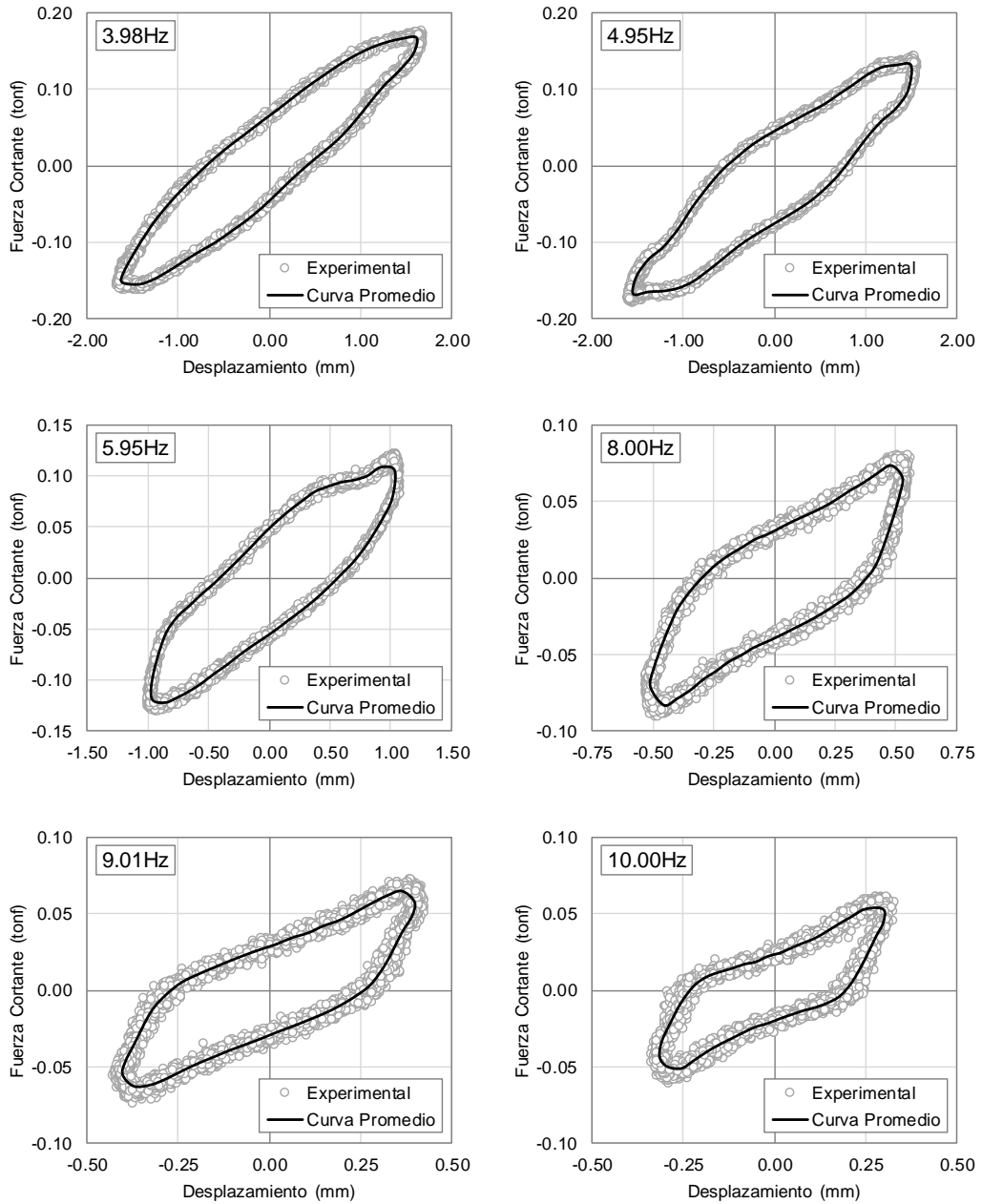


Figura N° 5.10 Fuerza cortante vs desplazamiento
 (Fuente: Elaboración propia)

El resumen del procesamiento de los lazos histeréticos se pueden apreciar en la Tabla N° 5.3; donde f y T corresponden a la frecuencia y periodo de vibración de la mesa vibradora; D , es el desplazamiento máximo promedio del lazo histerético; W_{Dexp} , es la energía disipada experimentalmente por cada lazo de histéresis, la cual corresponde al área de cada lazo histerético; K_{eq} , corresponde a la rigidez

lateral equivalente del sistema de aislamiento para cada lazo de histéresis; y h_{eq} , el amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento. Adicionalmente, el amortiguamiento y la degradación de la rigidez equivalente en función del desplazamiento se aprecian en la Figura N° 5.11 y Figura N° 5.12 respectivamente.

Tabla N° 5.3 Rigidez y amortiguamiento equivalentes

Registro	f (Hz)	T (seg)	D (mm)	W_{Dexp} (tonf-mm)	K_{eq} (tonf/mm)	h_{eq} (%)
1	3.98	0.251	1.619	0.279	0.100	16.97
2	4.95	0.202	1.525	0.281	0.098	19.58
3	5.95	0.168	1.001	0.171	0.115	23.46
4	8.00	0.125	0.519	0.064	0.151	25.01
5	9.01	0.111	0.401	0.041	0.160	25.35
6	10.00	0.100	0.309	0.025	0.170	24.86

(Fuente: Elaboración propia)

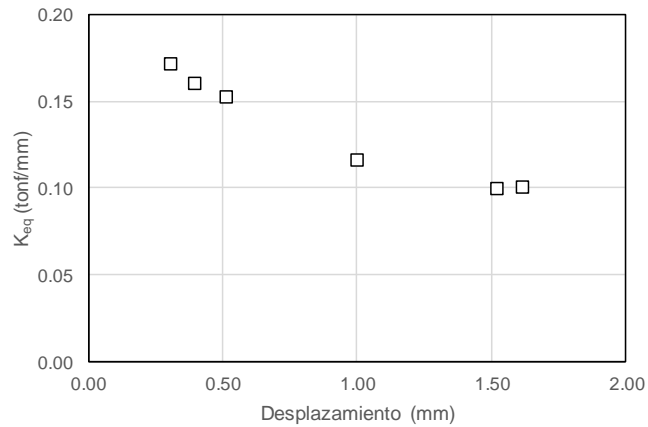


Figura N° 5.11 Rigidez lateral equivalente vs desplazamiento
 (Fuente: Elaboración propia)

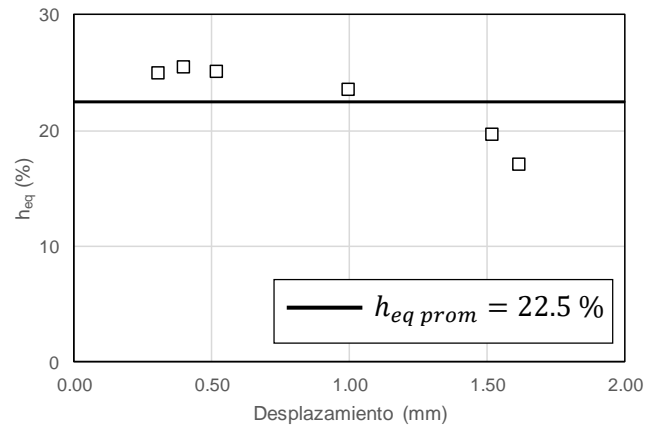


Figura N° 5.12 Amortiguamiento equivalente vs desplazamiento
 (Fuente: Elaboración propia)

5.4 COMPARACIÓN CON EL MODELO BILINEAL

De las curvas de histéresis experimentales presentadas anteriormente, se toman las correspondientes a 8.00, 9.01 y 10.00Hz, debido a la aproximación que se observa con el modelo bilineal. Dichas curvas experimentales fueron analizadas y procesadas para obtener los parámetros correspondientes a cada lazo descritas en la Sección 3.4, los cuales se muestran en la Tabla N° 5.4.

Para la obtención de los parámetros, se realizaron regresiones lineales a las curvas de histéresis de cada registro analizado para determinar el valor de la rigidez postfluencia, K_2 . El valor de la rigidez inicial, K_1 , se determinó aproximadamente como diez veces el valor de la rigidez postfluencia. Para el cálculo de Q , se usó la rigidez lateral equivalente mediante la aplicación de la Ecuación (3.47). Por otro lado, se controló la energía disipada por ciclo usando la Ecuación (3.50), para el cálculo del desplazamiento de fluencia D_y . Finalmente se calculó el error respecto de la energía disipada por ciclo del modelo bilineal, respecto de la energía disipada experimentalmente mostrada en la Tabla N° 5.3, obteniéndose valores con un error menor de 10%.

Tabla N° 5.4 Prámetros del modelo bilineal

Registro	f (Hz)	D (mm)	W_D (tonf-mm)	K_2 (tonf/mm)	K_1 (tonf/mm)	D_y (mm)	Error (%)
4	8.00	0.062	0.062	0.089	0.895	0.040	3.93%
5	9.01	0.037	0.037	0.097	0.970	0.029	8.57%
6	10.00	0.024	0.024	0.102	1.025	0.023	5.39%

(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura N° 5.13, se aprecia la comparación entre las curvas histeréticas experimentales promedios y el modelo bilineal. La comparación corresponde a los lazos de histéresis de los registros correspondientes a 8.00, 9.01 y 10.00Hz. De la figura, se puede apreciar la buena aproximación entre los datos experimentales y el modelo bilineal presentado en esta investigación.

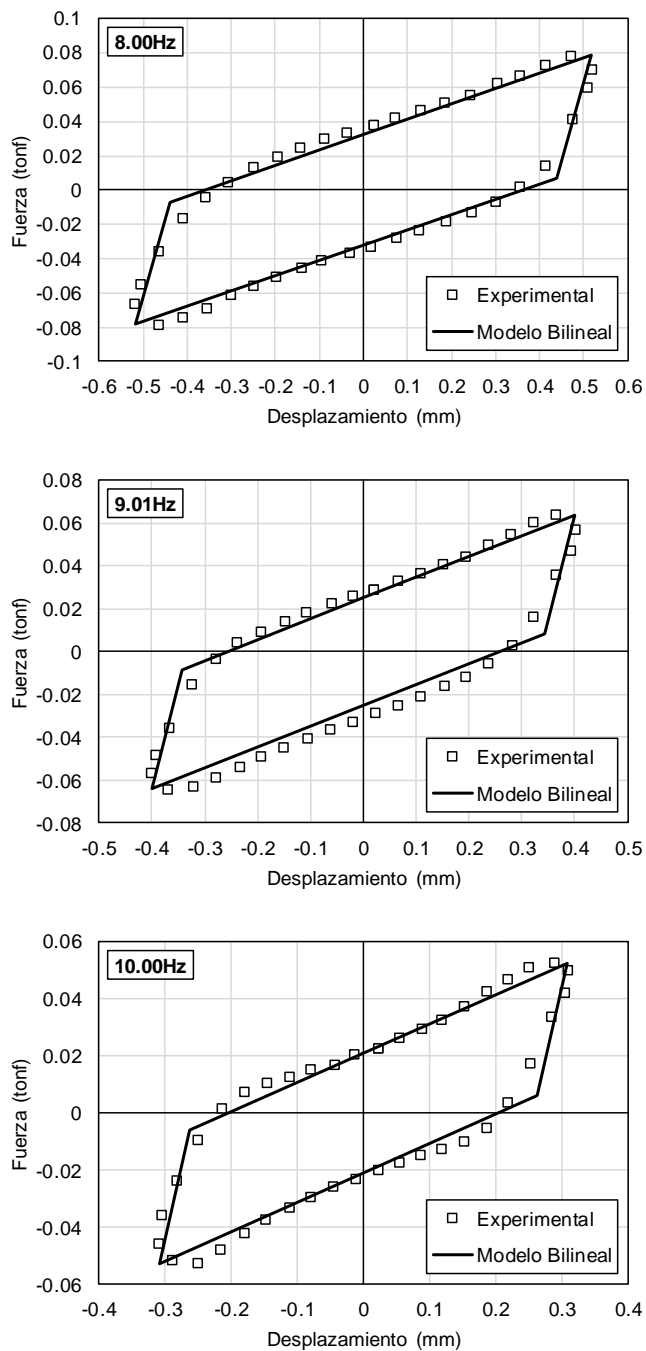


Figura N° 5.13 Comparación con el modelo bilineal
(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO VI: PROPUESTA PARA EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO

6.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

La propuesta para el procedimiento de diseño de una edificación sísmicamente aislada en Perú presentado en esta investigación, está basado en las recomendaciones del Consejo Internacional para la Investigación e Innovación en Edificaciones y Construcción (International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB) usando el procedimiento de diseño preliminar CW2012 y, además, tomando en consideración la Norma de Diseño Sismorresistente NTE. E.030-2018. [6][7][8][9][13][25][26]

La Figura N° 6.1 muestra el procedimiento general de diseño de una edificación sísmicamente aislada.

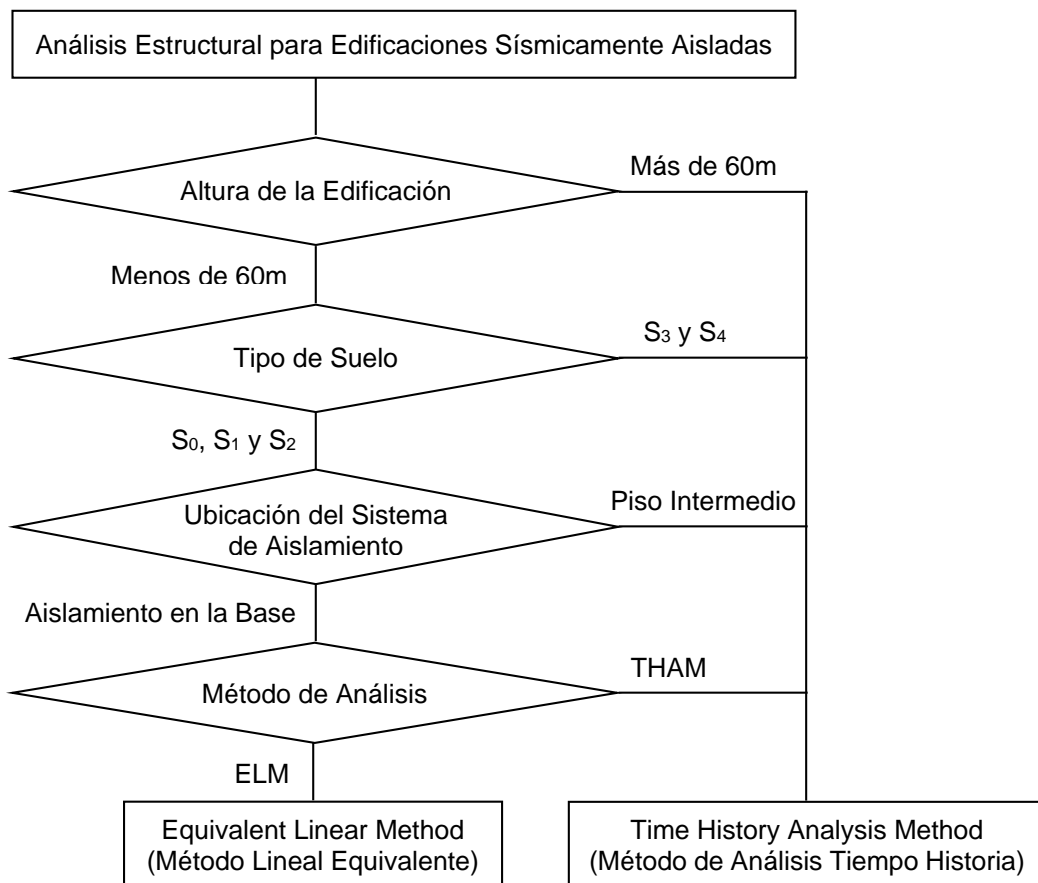


Figura N° 6.1 Diagrama de flujo para una edificación aislada
(Fuente: Adaptado de Iba e Inoue, 2012)

El aislamiento sísmico necesita tener las siguientes funciones:

- Ser capaz de soportar el peso de la carga muerta y carga viva de la superestructura, incluso durante un sismo.
- Tener un apropiado periodo largo, a fin de reducir la demanda sísmica sobre la edificación.
- Debe contar con una fuerza restauradora para regresar la edificación a su posición inicial, permitiendo un pequeño desplazamiento residual.
- Tener el suficiente amortiguamiento en el sistema de aislamiento a fin de garantizar la disipación de energía durante el movimiento sísmico.
- Tener una adecuada rigidez inicial a fin de no sufrir deformaciones ante eventos sísmicos menores o incluso ante la acción del viento.

6.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

Las edificaciones sísmicamente aisladas pueden ser diseñadas usando el método de análisis lineal equivalente (Equivalent Linear Method, ELM) o un análisis tiempo historia (Time History Analysis Method, THAM). Sin embargo, existen limitaciones para realizar el método de análisis lineal equivalente, el cual se basa en el análisis de un sistema equivalente de un grado de libertad; las limitaciones son mostradas a continuación:

Tabla N° 6.1 Limitaciones del método lineal equivalente

Condición	Limitación
Tipo de suelo permitido:	S ₀ , S ₁ y S ₂ *
Altura máxima de la superestructura:	< 60m
Ubicación del sistema de aislamiento:	Sólo en la base
Excentricidad máxima permitida:	< 3%
Tensión en el aislador:	No permitida
Fuerza de fluencia:	> 3%W **
Periodo del sistema de aislamiento:	> 2.0seg ***

* Tipo de suelo sin posibilidad de licuación.

** W es el peso de la superestructura

*** Sólo considerando la rigidez del aislador.

(Fuente: Elaboración propia)

6.2.1 Espectro de Diseño

Tomando en cuenta la Norma de Diseño Sismorresistente NTE E.030-2018 [20], la demanda sísmica para diseñar una edificación sísmicamente aislada se obtiene a partir del espectro de respuesta de aceleraciones (S_a) usando la Ecuación (6.1).

$$S_a = \frac{ZUCS}{R}g \quad (6.1)$$

Donde:

- Z: Factor de Zona.
- U: Factor de Uso o Importancia.
- C: Factor de Amplificación Sísmico.
- S: Factor de Amplificación del Suelo.
- g: Aceleración de la Gravedad.
- R: Coeficiente de Reducción Sísmica. Para el coeficiente de reducción sísmica puede considerarse igual a 1 para edificaciones sísmicamente aisladas. (CW2012)

La filosofía de diseño para edificaciones sísmicamente aisladas sigue dos criterios:

- Sismo Nivel 1: Es el Sismo de Diseño, el cual corresponde a un sismo con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años; equivalente a un periodo de retorno de 475 años. Este nivel es usado para el diseño convencional de edificaciones.
- Sismo Nivel 2: Es el Sismo Máximo, el cual corresponde a un sismo con 2% de probabilidad de excedencia en 50 años; equivalente a un periodo de retorno de 2500 años. Este nivel se define para determinar el máximo desplazamiento de diseño del sistema de aislamiento. Además, el espectro de respuesta de aceleraciones se debe considerar como αS_a , donde $\alpha = 1.3 \sim 1.5$.

6.2.2 Factor de Amortiguamiento

El factor de amortiguamiento para edificaciones sísmicamente aisladas bajo un sismo de Nivel 1 es usualmente alrededor de 20% (Feng, 2006). Según el

Código Japonés de Edificaciones, el factor de amortiguamiento, definido tal como se muestra en la Ecuación (6.2), afecta la respuesta en términos del desplazamiento del sistema de aislamiento, y tiene una buena aproximación usando el método lineal equivalente. [8][9][25]

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10(h_v + 0.8h_d)} ; F_h \geq 0.4 \quad (6.2)$$

Donde, h_v : Amortiguamiento viscoso efectivo de un amortiguador viscoso. h_d : Amortiguamiento hysterético del sistema de aislamiento. Ambos parámetros, corresponden al amortiguamiento de los dispositivos de amortiguamiento, los cuales se determinan experimentalmente y son proporcionados por el fabricante.

6.2.3 Fuerza Cortante

La fuerza cortante que actúa tanto en el nivel del sistema de aislamiento como en la superestructura, está definida por la Ecuación (6.3).

$$Q_s = \gamma_e K_{eq} \delta$$
$$Q_i = \frac{M_i H_i}{\sum_{i=1}^n M_i H_i} Q_s \quad (6.3)$$

Donde:

- Q_s : Fuerza cortante en el nivel del sistema de aislamiento.
- Q_i : Fuerza cortante en el i-ésimo piso de la superestructura.
- M_i : Masa en el i-ésimo piso.
- H_i : Altura de entrepiso del i-ésimo piso.
- δ : Desplazamiento de diseño del sistema de aislamiento.
- K_{eq} : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento.
- γ_e : Factor de seguridad relacionado a la variación de las propiedades debido al cambio de temperatura, envejecimiento o tolerancias en las dimensiones.

6.2.4 Desplazamiento de Diseño

El desplazamiento de diseño, está definido en función de la aceleración espectral, la masa total de la superestructura, la rigidez efectiva del sistema de aislamiento y el factor de amortiguamiento; este desplazamiento de diseño corresponde al sismo Nivel 1, se obtiene usando la Ecuación (6.4).

$$\delta = \frac{F_h S_a M_T}{K_{eq}} \quad (6.4)$$

Donde:

- S_a : Aceleración espectral.
- M_T : Masa total de la superestructura.
- F_h : Factor de amortiguamiento.
- δ : Desplazamiento de diseño del sistema de aislamiento.
- K_{eq} : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento.

Para la realización del análisis usando el método lineal equivalente, la superestructura será considerada como un cuerpo rígido, por lo que se usará un modelo masa-resorte tomando en consideración las características del sistema de aislamiento. El proceso de convergencia del método lineal equivalente se resume en la Figura N° 6.2 y Figura N° 6.3.

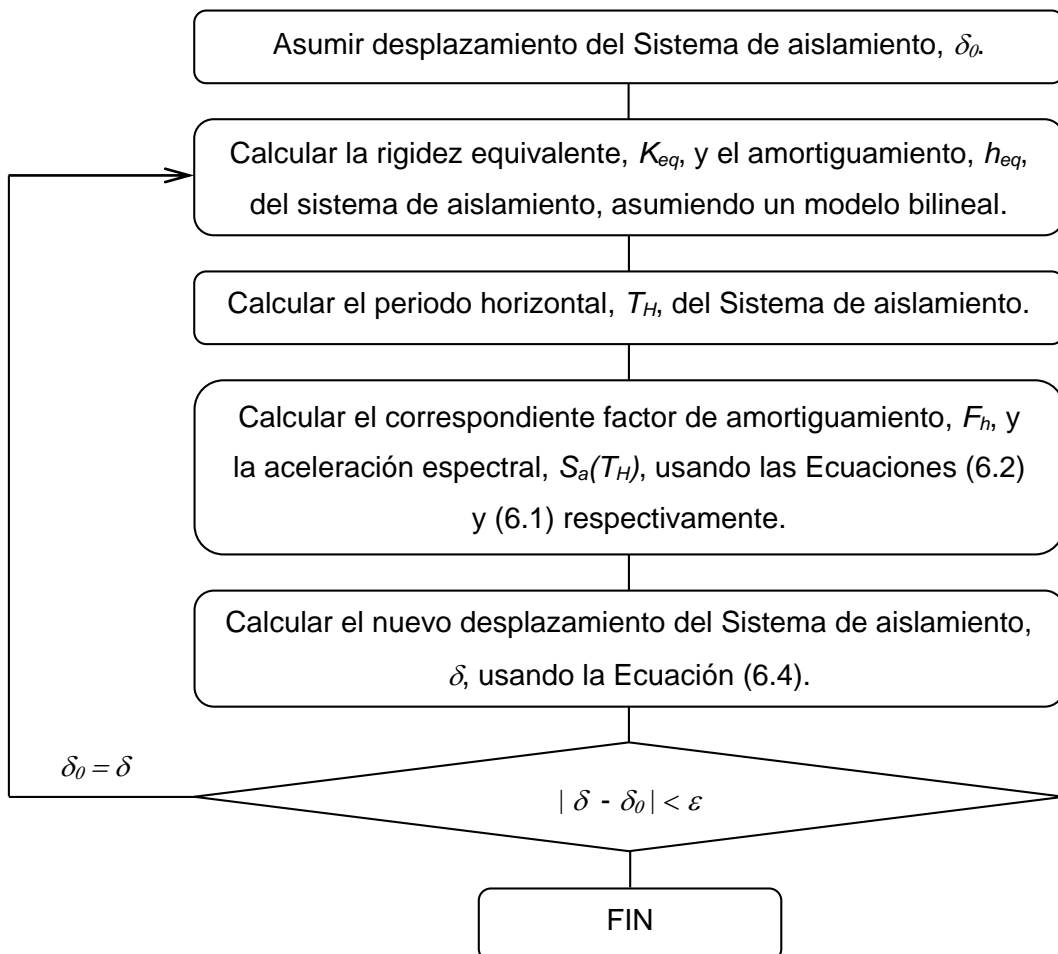


Figura N° 6.2 Diagrama de flujo para la convergencia del ELM
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

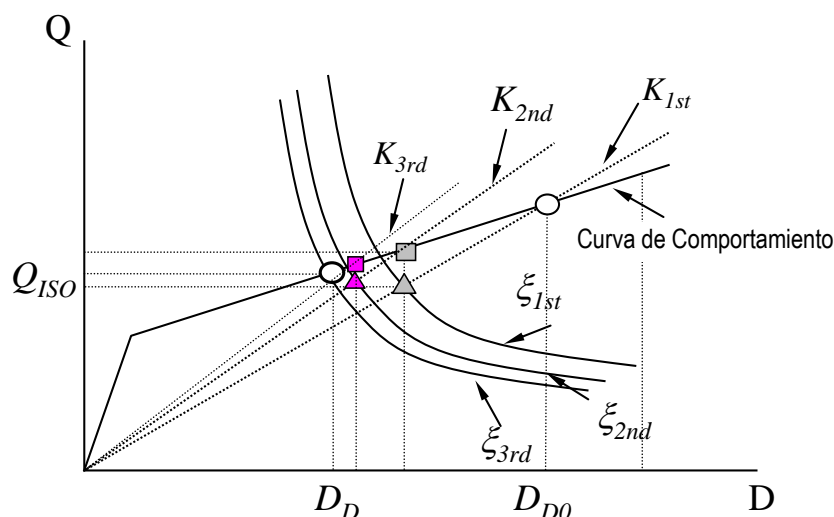


Figura N° 6.3 Convergencia del ELM
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

6.2.5 Máximo Desplazamiento de Diseño

El máximo desplazamiento de diseño está definido bajo la acción del sismo Nivel 2, tal como muestra la

$$\delta_{max} = \frac{F_h \gamma_\alpha S_a M_T}{K_{eq}} \quad (6.5)$$

$$\delta_{gap} = \gamma_t \gamma_e \delta_{max}$$

Donde:

δ_{max} : Máximo desplazamiento de diseño bajo un sismo Nivel 2.

δ_{gap} : Máximo desplazamiento de diseño usado para determinar la separación del sistema de aislamiento.

γ_t : Factor de seguridad relacionado a la excentricidad del sistema de aislamiento.

γ_e : Factor de seguridad relacionado a la variación de las propiedades debido al cambio de temperatura, envejecimiento o tolerancias en las dimensiones.

γ_α : Factor de seguridad para un sismo Nivel 2 (1.3~1.5).

K_{eq} : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento.

6.2.6 Otras Consideraciones

Para el procedimiento de diseño de un sistema de aislamiento, los siguientes criterios deben ser verificados:

- El esfuerzo de fluencia del sistema de aislamiento debe ser mayor que la fuerza de viento actuante sobre la superestructura.
- No se permite la fuerza de tensión en el elastómero (caucho) para el desplazamiento de diseño.
- El sistema de aislamiento no debe colapsar para el desplazamiento de diseño máximo.

6.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO CON NUCLEO DE PLOMO

Considerando la versatilidad del aislamiento de caucho con núcleo de plomo (LRB) y que es uno de los aisladores más comerciales alrededor del mundo, puesto que cuenta con un alto nivel de amortiguamiento el cual es proporcionado por el núcleo de plomo, en comparación con el aislador de caucho natural (NRB) el cual presenta una tendencia de comportamiento elástica; por otro lado el aislamiento de alto amortiguamiento (HRB) también ofrece un grado de amortiguamiento del sistema de aislamiento, sin embargo tiene un mayor costo de fabricación, motivo por el cual lo que la presente investigación resume el procedimiento de diseño para una estructura sísmicamente aislada en la base, siguiendo el Método Lineal Equivalente. (ver Figura N° 6.4)

Esta metodología también puede adaptarse para el diseño de un sistema de aislamiento de caucho natural como para un sistema de aislamiento con caucho de alto amortiguamiento.

Por otro lado, aunque no se contempla en la presente investigación, también puede adaptarse un modelo bilineal modificado, considerando la degradación de la rigidez del aislador e incorporando el módulo de corte del aislador como función de la deformación de corte mostrado previamente en la Sección 5.1.

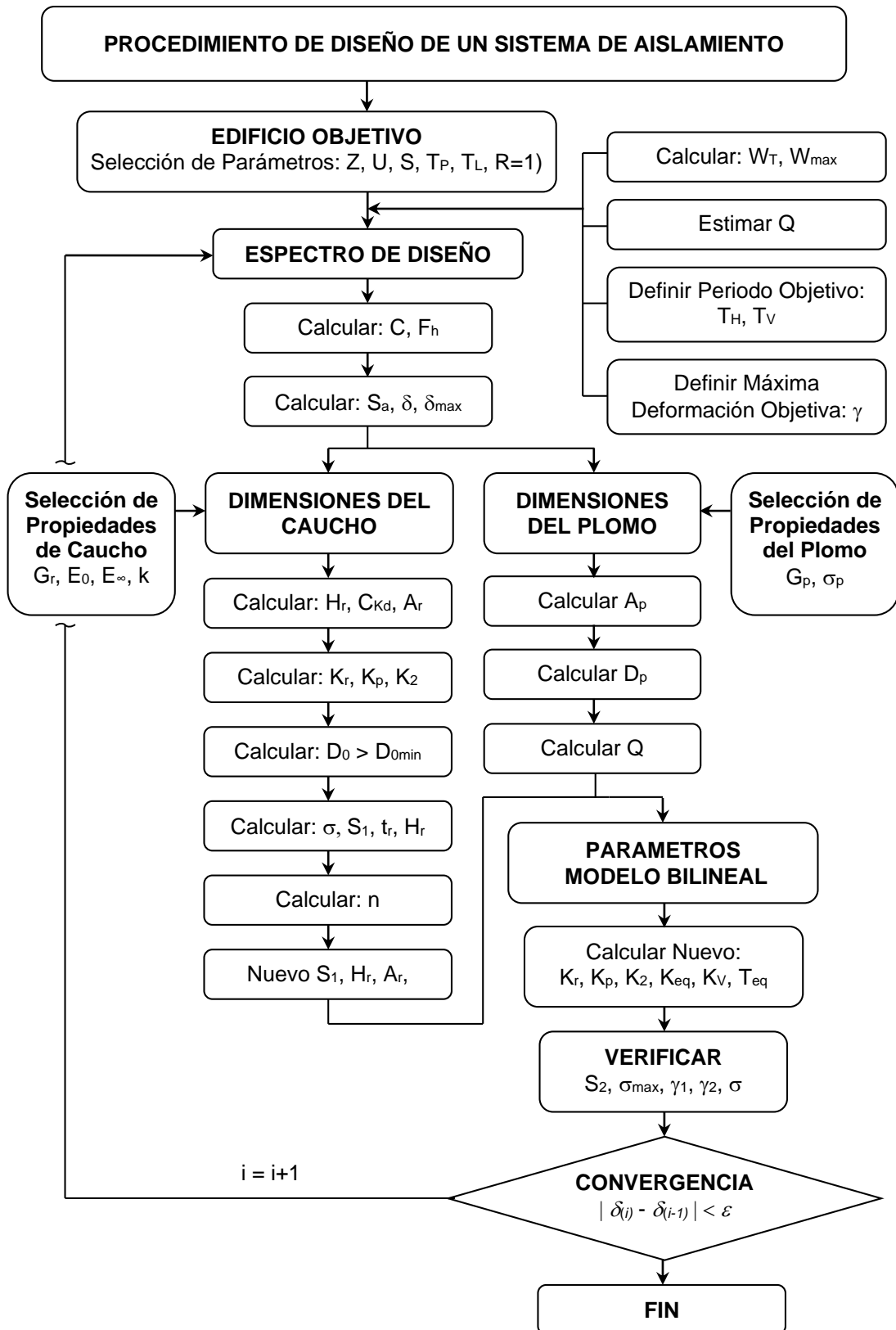


Figura N° 6.4 Procedimiento de un Sistema de Aislamiento en la Base
(Fuente: Reyna y Saito, 2012)

6.3.1 Paso 1: Diseño objetivo

- Calcular el peso total de la superestructura sobre el nivel de aislamiento, W_T .
- Calcular el peso máximo considerando la posibilidad de volteo, W_{max} .
- Definir el periodo horizontal objetivo del sistema de aislamiento, T_H .
Donde $T_H = 2 \sim 3 \text{ seg.}$ [26]
- Definir el periodo vertical objetivo, T_V . Donde $F_V \geq 13\text{Hz}$.
- Asumir un esfuerzo de fluencia inicial, Q . Donde $Q \approx 0.3W_T$.
- Calcular el desplazamiento de diseño, δ , usando la Ecuación (6.4).
- Calcular el máximo desplazamiento, δ_{max} , usando la Ecuación (6.5).
- Definir la deformación unitaria de corte máxima del caucho bajo el sismo de Nivel 1, $\gamma = 200\%$.

6.3.2 Paso 2: Rigidez objetiva

- Calcular la rigidez equivalente objetiva del sistema de aislamiento, K_{eq} .

$$K_{eq} = \frac{W_T}{g} \left(\frac{2\pi}{T_H} \right)^2 \quad (6.6)$$

- Calcular la rigidez vertical objetiva del sistema de aislamiento, K_V . Para tal motivo se asume una rigidez objetivo inicial de acuerdo con la Ecuación (6.7), posteriormente se usara la Ecuación (6.8), para el nuevo cálculo de la rigidez vertical.

$$K_V = \frac{W_T}{g} \left(\frac{2\pi}{T_V} \right)^2 \quad (6.7)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_0(1 + 2kS_1^2)} + \frac{1}{E_\infty} \quad (6.8)$$

$$K_V = \frac{AE_c}{nt_r}$$

6.3.3 Paso 3: Selección de las propiedades del caucho

- Asumir un módulo de corte para el caucho, G_r .
- Asumir un módulo de elasticidad para el caucho, $E_0 = 2G(1 + \nu)$.

- Considerar el módulo de vulcanizado para el caucho, E_{∞} .
Donde $E_{\infty} = 20000 \text{ kgf/cm}^2$.
- Considerar el módulo corrección de endurecimiento del caucho, κ . [15]

6.3.4 Paso 4: Dimensiones del núcleo de plomo

- Calcular el módulo de corte del núcleo de plomo, G_p . Donde $G_p \approx 4G_r$.
- Asumir un esfuerzo de fluencia para el núcleo de plomo, σ_p .
Donde $\sigma_p \approx 85 \text{ kgf/cm}^2$
- Calcular el área de la sección del núcleo de plomo, A_p .

$$A_p = \frac{Q}{\sigma_p} \quad (6.9)$$

- Calcular el diámetro de la sección del núcleo de plomo, D_p .

$$D_p = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} \quad (6.10)$$

- Calcular nuevamente A_p y Q .

6.3.5 Paso 5: Dimensiones del caucho

- Calcular el espesor total del caucho, H_r . Donde $H_r = \delta/\gamma$.
- Calcular el desplazamiento del sistema de aislamiento correspondiente al 100% de la deformación de corte del caucho, X_d .
- Calcular C_{Kd} correspondiente al 100% de la deformación de corte del caucho, usando la Ecuación (6.11).

$$C_{Kd}(\gamma) = \begin{cases} 0.744\gamma^{-0.427} & \rightarrow \gamma < 0.5 \\ 0.921\gamma^{-0.25} & \rightarrow 0.5 \leq \gamma \end{cases} \quad (6.11)$$

- Calcular el área de la sección de caucho, A_r .

$$A_r = \frac{1}{C_{Kd}} \left(K_{eq} + \frac{Q}{X_d} \right) \frac{H_r}{G_r} - A_p \frac{G_p}{G_r} \quad (6.12)$$

- Calcular la rigidez lateral del caucho, K_r .

$$K_r = \frac{G_r A_r}{H_r} \quad (6.13)$$

- Calcular la rigidez lateral del núcleo de plomo, K_p .

$$K_p = \frac{G_p A_p}{H_r} \quad (6.14)$$

- Calcular la rigidez postfluencia, K_2 , y rigidez inicial, K_1 , usando las Ecuaciones (3.47) y (3.46) respectivamente.
- Calcular el diámetro del aislador, D_0 , y tomar un valor apropiado.

$$D_0 = \sqrt{\frac{4A_r}{\pi} + D_p^2} \quad (6.15)$$

- Calcular el esfuerzo de compresión sobre el caucho, σ .

$$\sigma = \frac{W_T}{(D_0^2 - D_p^2) \frac{\pi}{4}} \quad (6.16)$$

- Calcular el factor de forma primario, S_1 , resolviendo la Ecuación (6.17).

$$K_V = \frac{\pi D_0^2}{4H_r} \frac{E_0(1 + 2kS_1^2)E_\infty}{E_0(1 + 2kS_1^2) + E_\infty} \quad (6.17)$$

- Calcular el espesor de la lámina de caucho, t_r , y tomar un valor apropiado.

$$t_r = \frac{D_0}{4S_1} \quad (6.18)$$

- Calcular un nuevo factor de forma primario, S_1 , definido por la Ecuación (6.19). S_1 no debe ser mayor que 25.

$$S_1 = \frac{D_0}{4t_r} \leq 25 \quad (6.19)$$

- Calcular el número de láminas de caucho, n y tomar un valor entero apropiado.

$$n = \frac{H_r}{t_r} \quad (6.20)$$

- Calcular nuevamente: A_r , H_r , K_r , K_p , K_d , K_{eq} , K_y y el nuevo periodo T_H .

$$T_H = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eq}}} \quad (6.21)$$

6.3.6 Paso 6: Verificaciones

- Calcular el factor de forma secundario, S_2 , el cual se define en la Ecuación (6.22).

$$S_2 = \begin{cases} \frac{D_0}{H_r} & \rightarrow \frac{D_0}{H_r} \leq 6 \\ 6 & \rightarrow S_2 > 6 \end{cases} \quad (6.22)$$

- Verificar la deformación unitaria de corte bajo el sismo de Nivel 1, γ_1 . Este valor no deberá superar el 200%.

$$\gamma_1 = \frac{\delta}{H_r} \leq 200\% \quad (6.23)$$

- Calcular la máxima deformación unitaria de corte bajo el sismo de Nivel 2, γ_2 . Este valor no deberá superar el 400%.

$$\gamma_2 = \frac{\delta_{max}}{H_r} \leq 400\% \quad (6.24)$$

- Calcular el máximo esfuerzo de compresión sobre la lámina de caucho, σ_{max} . Este valor no deberá superar el 200kgf/cm².

$$\sigma_{max} = \frac{W_{max}}{(D_0^2 - D_p^2) \frac{\pi}{4}} \leq 200kgf/cm^2 \quad (6.25)$$

- Calcular el esfuerzo critico de corte, σ_{cr} .

$$\sigma_{cr} = \xi G_r S_1 S_2 \quad (6.26)$$

$$\xi = \begin{cases} 0.85 & \rightarrow S_1 \geq 30 \\ 0.90 & \rightarrow S_1 < 30 \end{cases}$$

- Verificar el esfuerzo de corte, (ver Figura N° 6.5).

$$\text{Case 1} \rightarrow \sigma_{cr} \left(1 - \frac{4}{\alpha_c S_2}\right) < 30 \text{ N/mm}^2 (306 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$\text{Case 2} \rightarrow \sigma_{cr} \left(1 - \frac{4}{\alpha_c S_2}\right) \geq 30 \text{ N/mm}^2 (306 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{cr} \left(1 - \frac{\gamma}{\alpha_c S_2}\right) & \rightarrow \text{Case 1} \\ \sigma_{cr} \left(1 - \frac{\gamma}{4}\right) + \frac{30}{4} \gamma & \rightarrow \text{Case 2} \end{cases} \leq 60 \text{ N/mm}^2 (612 \text{ kgf/cm}^2) \quad (6.27)$$

$$\alpha_c = \begin{cases} 1 & \rightarrow S_2 < 4 \\ 0.1(S_2 - 3) + 1 & \rightarrow S_2 \geq 4 \end{cases}$$

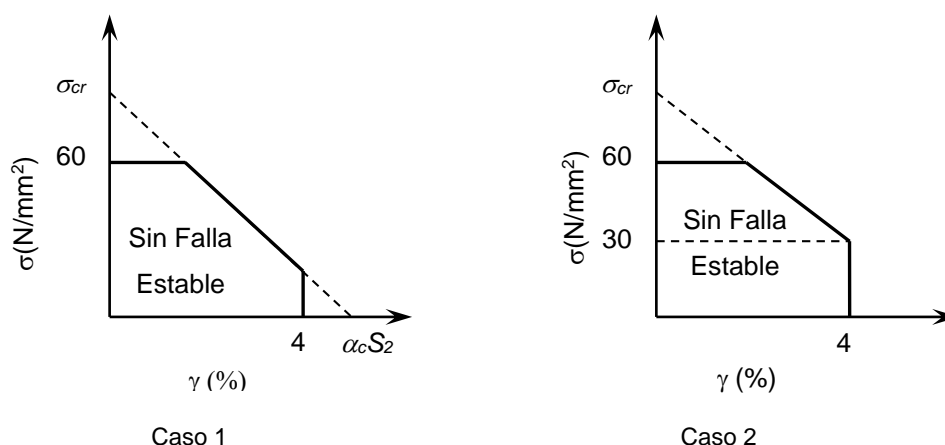


Figura N° 6.5 Límites de esfuerzo de corte
(Fuente: Higashino y Okamoto, 2006)

6.4 EJEMPLO APLICATIVO DE DISEÑO

A continuación, se muestra un ejemplo aplicativo del proceso de diseño de un aislador de caucho con núcleo de plomo para una edificación sísmicamente aislada en Perú, siguiendo los pasos descritos en la sección anterior y de acuerdo a la estipulado en la Norma de Diseño Sismorresistente NTE E.030-2018 [20].

El edificio considerado se encuentra ubicado en Lima, el cual corresponde a una zona sísmica 4 ($Z=0.45$), el tipo de suelo considerado es del tipo S1 ($S=1.0$, $T_P=0.4$ y $T_L=2.5$). El edificio considerado corresponde a un Hospital categorizado como A ($U=1.5$) y el coeficiente de reducción sísmica considerado es $R=1.0$.

Cálculos Previos

Factor de Zona, Zona 4 :	$Z =$	0.45
Tipo de Suelo, S1 :	$S =$	1.0
	$T_p =$	0.4 seg
	$T_L =$	2.5 seg
Factor de Importancia, Categoría A :	$U =$	1.5
Factor de Reducción Sísmica :	$R =$	1.0
Periodo objetivo del edificio aislado :	$T_H =$	3.0 seg
Factor de amplificación sísmica :	$C =$	0.278
Aceleración espectral, Ecuación(6.1) :	$S_a =$	183.9 cm/s ²
Factor de amortiguamiento, Ecuación (6.2) :	$F_h =$	0.535
hv=0.0, No se considera amortiguamiento viscoso		
hd=0.225, Referencialmente tomado como el amortiguamiento histerético promedio experimental, Figura N° 5.12)		
Desplazamiento de diseño, Ecuación (6.4) :	$\delta =$	22 cm
Desplazamiento máximo, Ecuación (6.5) :	$\delta_{max} =$	33 cm

Paso 1: Diseño Objetivo

Peso total soportado por un aislador (3 Pisos) :	$W =$	200 tonf
Peso máximo considerando efectos de volteo :	$W_T =$	300 tonf
Periodo horizontal objetivo del edificio aislado :	$T_H =$	3.0 seg
Periodo vertical objetivo ($f_v \geq 13\text{Hz.}$) :	$T_V =$	0.076 seg
Fuerza de fluencia del plomo :	$Q =$	6 tonf
(0.03W \leq Q _d \leq 0.1W)		
Desplazamiento objetivo :	$\delta =$	22 cm
Desplazamiento máximo :	$\delta_{max} =$	33 cm
Deformación de corte objetivo bajo sismo Nivel 1 :	$\gamma =$	200 %

Paso 2 Rigidez Objetiva

Rigidez lateral equivalente :	$K_{eq} =$	0.895 tonf/cm
Rigidez vertical equivalente :	$K_V =$	1394.88 tonf/cm

Paso 3: Selección de las Propiedades del Caucho

Módulo de corte del caucho, Ecuación (5.4) :	$G_r =$	8.96	kgf/cm ²
Asumir módulo de elasticidad del caucho :	$E_0 =$	26.88	kgf/cm ²
Módulo de vulcanizado del caucho :	$E_\infty =$	20000	kgf/cm ²
Módulo de corrección de endurecimiento del caucho [15] :	$\kappa =$	0.62	

Paso 4: Dimensiones del Núcleo de Plomo

Módulo de corte del núcleo de plomo, ($G_p \approx 4G_r$) :	$G_p =$	35.84	kgf/cm ²
Esfuerzo de fluencia del plomo :	$\sigma_p =$	85	kgf/cm ²
Área del núcleo de plomo :	$A_p =$	70.6	cm ²
Diámetro del núcleo de plomo :	$D_p =$	9.48	cm
Tomar diámetro del núcleo de plomo :	$D_p =$	9.5	cm
Nueva área del núcleo de plomo :	$A_p =$	70.9	cm²
Nueva fuerza de fluencia del plomo :	$Q =$	6.02	tonf

Paso 5: Dimensiones del Caucho

Espesor total del caucho :	$H_r =$	11	cm
Desplazamiento al 100% de deformación de corte :	$X_d =$	11	cm
C_{kd} al 100% de deformación de corte :	$C_{kd} =$	0.921	
Área del caucho :	$A_r =$	179.65	cm ²
Rigidez lateral del caucho :	$K_r =$	0.146	tonf/cm
Rigidez lateral del núcleo de plomo :	$K_p =$	0.231	tonf/cm
Rigidez postfluencia :	$K_2 =$	0.347	tonf/cm
Diámetro exterior del aislador :	$D_0 =$	17.9	cm
Tomar diámetro exterior del aislador :	$D_0 =$	45	cm
Esfuerzo de compresión sobre el caucho :	$\sigma =$	131.62	kgf/cm ²
Factor de forma primario :	$S_1 =$	23.63	
Espesor de lámina de caucho :	$t_r =$	0.476	cm
Tomar espesor de lámina de caucho :	$t_r =$	0.45	cm
Factor de forma primario :	$S_1 =$	25	OK

Número de capas de caucho :	$n =$	24.4	
Tomar número de capas de caucho :	$n =$	25	Capas
Nueva espesor total de caucho :	$H_r =$	11.25	cm
Nueva área de caucho :	$A_r =$	1519.55	cm²
Nueva rigidez lateral del caucho :	$K_r =$	1.210	tonf/cm
Nueva rigidez lateral del núcleo de plomo :	$K_p =$	0.226	tonf/cm
Nueva rigidez postfluencia :	$K_2 =$	1.323	tonf/cm
Nueva rigidez lateral equivalente :	$K_{eq} =$	1.870	tonf/cm
Nueva rigidez vertical :	$K_v =$	1443.43	tonf/cm
Nuevo Periodo de Diseño :	$T_H =$	2.076	seg
Separación sísmica del sistema de aislamiento :	$\delta_{gap} =$	43.56	cm
$\gamma_t = 1.1, \gamma_e = 1.2$			
Tomar separación sísmica del sistema de aislamiento :	$\delta_{gap} =$	45	cm

Paso 6: Verificaciones

Factor de forma secundario :	$S_2 =$	4.09	
Máximo esfuerzo de compresión del caucho :	$\sigma_{max} =$	197.43	kgf/cm ² OK
Deformación máxima de corte sismo Nivel 1 :	$\gamma_1 =$	195.6	% OK
Deformación máxima de corte sismo Nivel 2 :	$\gamma_2 =$	293.3	% OK
Esfuerzo crítico de corte :	$\sigma_{cr} =$	824.7	kgf/cm ² Caso 1
Esfuerzo máximo :	$\sigma_{max} =$	291.5	kgf/cm ² OK

CONCLUSIONES

- La presente investigación se centra en el estudio del comportamiento de un sistema de aislamiento y su interacción con la estructura, estudiar las propiedades mecánicas y dinámicas mediante estudios experimentales, así como proponer un procedimiento de diseño para un sistema de aislamiento en el Perú usando el método lineal equivalente.
- Del ensayo de módulo de corte de caucho, se pudo obtener el módulo de corte del caucho de acuerdo a la norma ASTM D-4014, el cual tiene un valor promedio de 8.96 kgf/cm² (0.879 MPa). Asimismo, del ensayo de módulo de corte del caucho, se obtuvo un amortiguamiento equivalente promedio de 9.23%.
- Durante el ensayo de módulo de corte, se aplicó una carga a los especímenes hasta una deformación de corte de 200%, y uno de los especímenes hasta la rotura, la cual ocurrió a 300% de la deformación de corte del caucho. Considerando los diferentes niveles de deformación de corte ensayados, el módulo de corte del caucho presenta una dependencia con respecto de la deformación de corte del caucho, la cual puede ser calculada mediante la ecuación (5.6) propuesta.
- Del ensayo dinámico sobre una mesa vibradora del modelo de tres niveles de acero con y sin sistema de aislamiento, se verificó un incremento del periodo de vibración de 68.3% y un incremento en el amortiguamiento de 90.3%, del modelo de base aislada respecto del modelo con base fija, con lo que se evidencia su efectividad.
- El desplazamiento máximo registrado durante el ensayo dinámico sobre la mesa vibradora corresponde a una deformación de corte máxima de la lámina de caucho de casi 10%. El bajo nivel de deformación de corte del sistema de aislamiento, en comparación con la deformación de corte lograda durante el ensayo de módulo de corte es debido a la limitación de carga vertical que soporta la mesa vibradora. Además, se obtuvo un amortiguamiento del sistema de aislamiento de alrededor de 20%.

- Del análisis realizado al modelo con y sin base aislada, usando el software SAP2000 y MDOF-BI), tomando en consideración las características geométricas, de masa y de rigidez del modelo, se obtuvieron valores aproximados del periodo de vibración en comparación con el periodo de vibración experimental.
- De los modos de vibración del modelo con base aislada, el primer modo de vibración muestra el desacoplamiento del movimiento del modelo, concentrándose los desplazamientos en el nivel de aislamiento. Este resultado es concordante con lo observado durante el ensayo dinámico sobre la mesa vibradora.
- El modelo bilineal propuesto, ajusta los lazos histeréticos analizados del ensayo dinámico con mesa vibradora, con un error menor al 10%. Donde el error fue medido respecto de la energía disipada por lazo histerético. Por otro lado, aunque no se contempla en la presente investigación, también puede adaptarse un modelo bilineal modificado, considerando la degradación de la rigidez del aislador e incorporando el módulo de corte del aislador como función de la deformación de corte mostrado previamente en la Sección 5.1.
- La propuesta de diseño de un sistema de aislamiento sísmico, está basado en las recomendaciones del Consejo Internacional para la Investigación e Innovación en Edificaciones y Construcción (International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB) usando el procedimiento de diseño preliminar CW2012 y, además, tomando en consideración la Norma de Diseño Sismorresistente NTE. E.030-2018.
- El método de análisis lineal equivalente presentado en esta investigación, puede aplicarse para el diseño de un sistema de aislamiento de caucho natural, sistema de aislamiento de caucho con núcleo de plomo o un sistema de aislamiento con caucho de alto amortiguamiento.

RECOMENDACIONES

- El caucho usado para la fabricación de los especímenes, fue un caucho sintético (Neopreno), sin embargo, para el desarrollo de un sistema de aislamiento se requiere extender la investigación al desarrollo de un material elastomérico y que tenga un relativo bajo costo fabricación. Como alternativa a corto plazo, se propone el desarrollo de un prototipo de aislamiento de bajo costo usando caucho de llantas recicladas.
- Dada la dependencia del módulo de corte del caucho respecto de la deformación de corte, se recomienda la incorporación de la Ecuación (5.6), asimismo, se propone investigar la degradación de la rigidez del aislador como función la deformación de corte del caucho.
- Se debe considerar el estudio de los parámetros como el módulo de elasticidad, módulo de vulcanizado y módulo de corrección de endurecimiento del caucho, los cuales fueron asumidos conservadoramente para el desarrollo del ejemplo de aplicación para el diseño de un sistema de aislamiento sísmico.
- Durante el ensayo dinámico, el modelo con base aislada fue sometido repetidamente a diferentes frecuencias de vibración por un lapso de tiempo de alrededor de 60seg por cada frecuencia. Uno de los apoyos del sistema de aislamiento falló durante el ensayo debido a la fatiga que este presentó, notándose un incremento de la temperatura en la superficie de falla entre el caucho y la plancha de acero. Por tal motivo, debe tomarse en cuenta para futuras investigaciones el efecto de la fatiga y la temperatura sobre los dispositivos de aislamiento sísmico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arditzoglou Y.J., Yura J.A. y Haines A.H., "Test Methods for Elastomeric Bearings on Bridges", 1995.
- [2] Arriagada J., "Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos; Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional", Valdivia, Chile, 2005.
- [3] Bueno R. y Reyes J.C., "Criterios para el Uso de Aisladores en la Base de una Estructura en Concreto", Universidad de Los Andes, Bogotá Colombia.
- [4] Clark P.W., Aiken I.D., y Kelly J.M., "Experimental Testing of Reduced-Scale Seismic Isolation Bearings for the Advanced Liquid Metal Reactor", No. IWGFR-94, 1993.
- [5] Chopra A.K., "Dynamic of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering", University of California at Berkeley, Prentice Hall, Englewood, 2007.
- [6] Feng D., Miyama T., Liu W. y Chan T., "A New Design Procedure for Seismically Isolated Buildings based on Seismic Isolation Codes Worldwide", 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, 2012.
- [7] Feng D., Miyama T., Torii T., Yoshida S., Ikenaga M. y Shimoda I., "A New Analytical Model for The Lead Rubber Bearing", 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000.
- [8] Feng D., Saito T. y Miyama T., "A Study of Seismic Isolation Codes Worldwide (Part I: Design Spectrum)", 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2012.
- [9] Feng D., Liu W., Masuda K., Wang S. y Huan S., "A Comparative Study of Seismic Isolation Codes Worldwide PART I: Design Spectrum". 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 2006.
- [10] Garevski M.A. y Kelly J.M., "Experimental Dynamic Tests on the First Structure in the World Isolated with Rubber Bearings", Proceedings of the 11th ECEE, Paris, France, 1998.

- [11] Garevski M.A., Kelly J.M. y Zisi, N.V., "Analysis of 3D Vibrations of the base Isolated School Building "Pestalozzi" by Analytical and Experimental Approach", Proceedings of the 12th WCEE, Auckland, New Zealand, 2000.
- [12] Higashino M. y Okamoto S., "Response Control and Seismic Isolation of Buildings", Taylor & Francis, 2006.
- [13] Iba M., Inoue N., "Structural Response Control – Seismic Isolation", IISEE Lecture Note, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering – Building Research Institute, Tsukuba, Japan, 2012.
- [14] Kelly J.M., "Earthquake-Resistant Design with Rubber", Second Edition, Springer-Verlag, London, 1997.
- [15] Kelly T.E., "Base Isolation of Structures: Design Guidelines", Holmes Consulting Group Ltd, 2001.
- [16] Kikuchi M. y Aiken I.D., "An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 215-231, 1997.
- [17] Kikuchi M., Aiken I.D., Kitamura Y. y Ueda M., "Seismic Response of Isolated Structures Depending on Hysteresis Models for Isolation Devices", 10th Anniversary Symposium on Performance of Response Controlled Buildings, Yokohama, Japan, 2004.
- [18] Mesa R. y Sanchez E., "Guía de Diseño Sísmico de Aisladores Elastoméricos y de Fricción para la República de Nicaragua", Nicaragua, 2010.
- [19] Naeim F. y Kelly J.M., "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", John Wiley & Sons, 1999.
- [20] Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma Técnica de Edificaciones NTE E.030, Norma de Diseño Sismorresistente, Perú: SENCICO, 2018.
- [21] Reyna R., Saito T. y Zavala C., "Numerical Simulation of Base Isolated Buildings During the Great East Japan Earthquake and a Comparison of Different Hysteresis Models", Technical Paper, 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Sendai, Japan, 2013.

- [22] Reyna R. y Saito T., "Numerical Simulation of Base Isolated Buildings During the Great East Japan Earthquake and a Proposal for a Design Procedure of Base Isolation System in Peru", Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 47, 103-108, Tsukuba, Japan, 2012.
- [23] Romo M., Falconeri R.A. y Bravo V., "Alternativas de Modelamiento de Estructuras con Aisladores Sísmicos Mediante SAP 2000", II Congreso de Ciencia y Tecnología. 2007.
- [24] Shibata A., "Dynamic Analysis of Earthquake Resistant Structure", Tohoku University Press, Sendai, Japan, 2010.
- [25] Saito T., Feng D. y Miyama T., "A Study of Seismic Isolation Codes Worldwide (Part II: Design Procedure)", 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2012.
- [26] Tena-Colunga A., "Development of Guidelines for the Seismic Design of Base Isolated Structures in Mexico", Memorias, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Control of Structures, Kobe, Japón, 2005.

ANEXO A: ENSAYO DE MÓDULO DE CORTE



Figura N° A.1 Matriz para la fabricación de especímenes.



Figura N° A.2 Láminas de acero arenadas.



Figura N° A.3 Matriz ensamblada.



Figura N° A.4 Prensa vulcanizadora.



Figura N° A.5 Espécimen durante proceso de vulcanizado.



Figura N° A.6 Desmontaje del espécimen.

(Fuente: Reyna. R, 2010)



Figura N° A.7 Espécimen después del vulcanizado.



Figura N° A.8 Vista de perfil del espécimen vulcanizado.



Figura N° A.9 Espécimen a ser ensayado.



Figura N° A.10 Láminas de caucho vulcanizadas.



Figura N° A.11 Ensayo de módulo de corte MC-01.



Figura N° A.12 Espécimen MC-01 después del ensayo.

(Fuente: Reyna. R, 2010)



Figura N° A.13 Ensayo de módulo de corte MC-02.



Figura N° A.14 Espécimen MC-02 durante el ensayo.



Figura N° A.15 Ensayo de módulo de corte MC-03.



Figura N° A.16 Espécimen MC-03 durante el ensayo.

(Fuente: Reyna. R, 2010)

ANEXO B: ENSAYO SOBRE MESA VIBRADORA



Figura N° B.1 Ensayo dinámico sobre mesa vibradora.



Figura N° B.2 Calibración de mesa vibradora con aprox. 120 kgf.



Figura N° B.3 Calibración de mesa vibradora con aprox. 240 kgf.



Figura N° B.4 Calibración de mesa vibradora con aprox. 360 kgf.

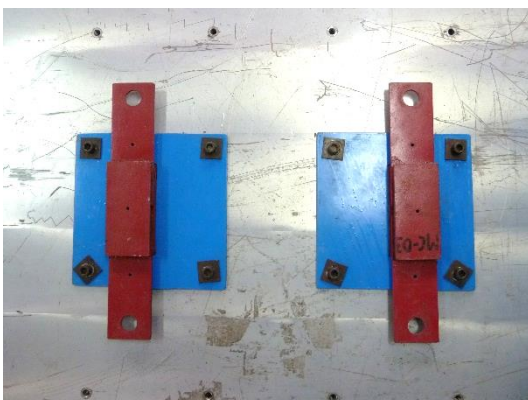


Figura N° B.5 Sistema de fijación del sistema de aislamiento.

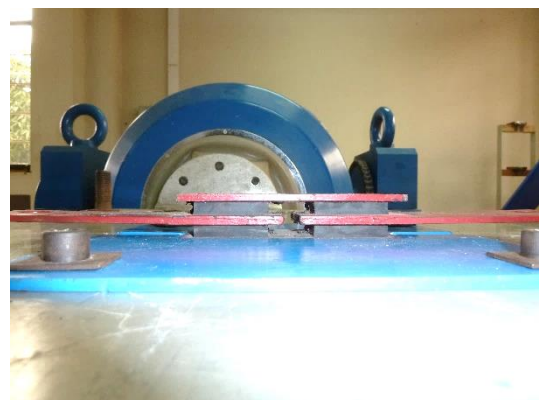


Figura N° B.6 Vista lateral del sistema de aislamiento.

(Fuente: Reyna. R, 2013)

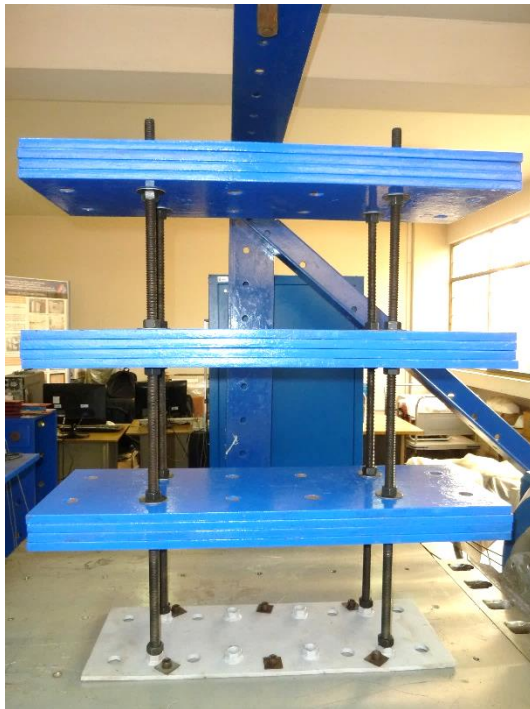


Figura N° B.7 Espécimen con base fija.

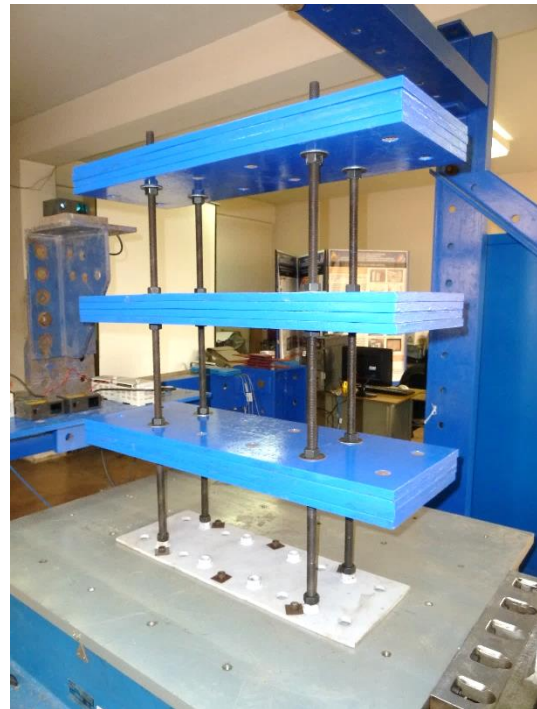


Figura N° B.8 Espécimen con base fija.



Figura N° B.9 Espécimen con base aislada.

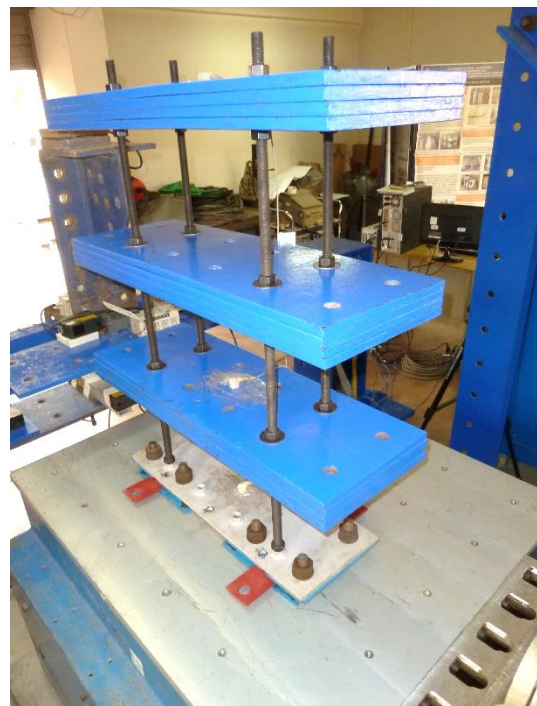


Figura N° B.10 Espécimen con base aislada.

(Fuente: Reyna. R, 2013)



Figura N° B.11 Transductores de desplazamiento laser.

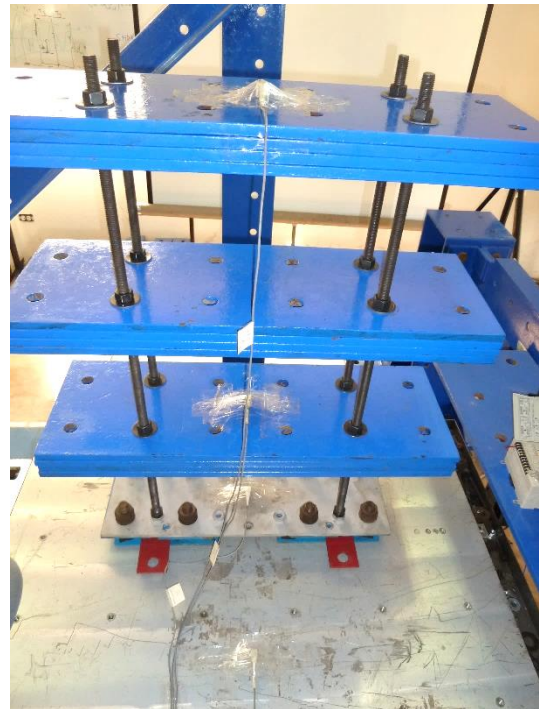


Figura N° B.12 Transductores de aceleración.



Figura N° B.13 Vista general durante el ensayo.



Figura N° B.14 Programa para la adquisición de datos.

(Fuente: Reyna. R, 2013)