

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERIA

SISTEMA UNIFICADO PARA EL AISLAMIENTO SÍSMICO Y AISLAMIENTO DE VIBRACIONES PARA EQUIPOS INDUSTRIALES Y ESTRUCTURAS LIVIANAS

GUILLERMO ANDRES GARCIA BARRENECHE

Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor: JOSE LUIS ALMAZÁN CAMPILLAY

Santiago de Chile, Diciembre de 2016 © 2016, Guillermo Andres Garcia Barreneche



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERIA

SISTEMA UNIFICADO PARA EL AISLAMIENTO SÍSMICO Y AISLAMIENTO DE VIBRACIONES PARA EQUIPOS INDUSTRIALES Y ESTRUCTURAS LIVIANAS

GUILLERMO ANDRES GARCIA BARRENECHE

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JOSE LUIS ALMAZÁN CAMPILLAY MATIAS ANDRES HUBE GINESTAR GABRIEL CANDIA AGUSTI NESTOR GUILLERMO ESCALONA BURGOS

Para completar las exigencias del grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Diciembre de 2016

A mis padres y mi esposa

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, que a través de mis padres recibí la mejor orientación y valores que han hecho de mí un hombre de bien. A ellos todo les debo. A mi esposa Stefania, incondicional en todo este proceso. Agradecimientos también al profesor Jose Almazán por la confianza depositada.

Esta Tesis fue financiada por: (1) Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT) a través del Proyectos Fondecyt 1120937, y Fondequip EQM120198; y (2) Vicerrectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Chile a través del Primer Concurso Programa Acelerador UC (2014-2015)

INDICE GENERAL

DED	ICATORIAii
AGR	ADECIMIENTOSii
INDI	CE DE TABLAS v
INDI	CE DE FIGURASvi
RESU	UMENvii
ABS	TRACTix
INTF	RODUCCIÓN 1
1.	 DISPOSITIVO DE AISLACIÓN PROPUESTO
2.	DISPOSITIVO DE REFERENCIA
3.	MODELOS CONSIDERADOS163.1Modelo M1: Equipo con aisladores convencionales173.1.1Orientación en Planta173.1.2Formas Modales173.1.3Funciones de respuesta en frecuencia193.1.4Condición Inicial193.2Modelo M2: Equipo con Aisladores ISO3D213.2.1Orientación en Planta223.2.2Formas Modales233.2.3Funciones de respuesta en frecuencia253.2.4Condición Inicial25
4	EXCITACIONES
5	RESULTADOS ANÁLISIS DINÁMICO

Pág.

	5.1	Respuestas comparativas entre los sistemas flexible y rígido31	
	5.2	Evaluación de la respuesta ocupando algunas excitaciones usadas e	n los
		ensayos del artículo de referencia	
6	AN	ÁLISIS DE FRAGILIDAD SÍSMICA 38	
7	COI	NCLUSIONES	
BIBI	LIOG	GRAFIA	
AN	EX(O S 47	
AN	E X (ANI	O S	
AN	E X (ANI	O S	
AN	E X (ANI	O S	
AN	E X (ANI ANI	O S	
AN	E X (ANI ANI	O S	

INDICE DE TABLAS

v

Tabla 1-I: Relaciones fuerza-Deformación de los resortes	8
Tabla 1.1: Comparación de técnicas basadas en modelos	9
Tabla 2-I: Tabla 3-3(Fathali and Filiatrault, 2007) Rigideces horizontales y verticales 1	5
Tabla 3-I: Formas modales del sistema de referencia 1	8
Tabla 3-II: Formas modales del sistema propuesto	4
Tabla 4-I. Tabla 5-1(Fathali and Filiatrault, 2007) Parámetros para la generación del	
espectro teórico para los casos base y techo 2	8
Tabla 4-II. Tabla 5-2(Fathali and Filiatrault, 2007) Aceleraciones punta de ajuste para	
sismos sintéticos	8
Tabla 5-I: Comparativa 3	2
Tabla 5-II: Respuestas máximas de desplazamiento del centro de masa 3	4
Tabla 5-III: Respuestas máximas de aceleración del centro de masa	4
Tabla 6-I: Algarrobo	8
Tabla 6-II: Tarapacá	9
Tabla 6-III: Tocopilla	9
Tabla 6-IV: El Maule	9

INDICE DE FIGURAS

Figura 0-1: Sistemas tradicionales	1
Figura 0-2: Aislador de goma y péndulo de fricción	2
Figura 0-3: Dispositivo usado por Suhara et al. (2002)	3
Figura 0-4: Configuraciones ensayadas Li et al. (2003)	4
Figura 1-1: a. Esquema del aislador (1) condición deformada y (2) condición indeformad	da,
b. Aislador Completo, c. Armazón	6
Figura 1-2: Relación constituvia en la dirección vertical	9
Figura 1-3 a. Modelo con un solo resorte, b. Modelo con dos resortes	. 10
Figura 1-4 Constitutivas Horizontales tipo	. 11
Figura 1-5Esquema disipador friccional	. 11
Figura 1-6Constitutiva Conceptual del disipador	. 12
Figura 1-7 Vista isométrica del dispositivo.	. 13
Figura 2-1 Figura 3-5 Articulo de referencia	. 14
Figura 2-2: Constitutivas del sistema de referencia	. 15
Figura 3-1: Figura 2-2 (Fathali and Filiatrault, 2007) Componentes del Equipo	. 16
Figura 3-2: Figura 2-3 (Fathali and Filiatrault, 2007) Dimensiones del Equipo	. 17
Figura 3-3: Funciones de respuesta e frecuencia del sistema de referencia, Aceleraciones	5
absolutas	. 19
Figura 3-4: Efecto de la aplicación del peso propio	. 20
Figura 3-5: Efecto de la aplicación de una carga horizontal	. 20
Figura 3-6: Relaciones constitutivas de los sistemas propuestos	. 22
Figura 3-7: Orientación de los ejes locales de los aisladores	. 23
Figura 3-8: Comportamiento esquemático del aislador en condiciones de servicio	. 23
Figura 3-9: Funciones de respuesta e frecuencia del sistema de propuesto, Aceleraciones	3
Absolutas	. 25
Figura 3-10: Efecto de la aplicación del peso propio	. 26
Figura 3-11: Efecto de la aplicación de una carga horizontal	. 26
Figura 4-1: Figura 5-2 (ref) Espectro teórico según el protocolo	. 27
Figura 4-2: Espectros generados en base a la información antes descrita	. 29
Figura 4-3: Sismo sintético nivel techo	. 30
Figura 4-4: Sismo sintético nivel base	. 30
Figura 5-1: Comparativo configuraciones M2a y M2b	. 32
Figura 5-2: Deflexiones traslacionales para el ensayo TS9-S7	. 35
Figura 5-3: Aceleraciones traslacionales para el ensayo TS9-S7	. 36
Figura 5-4: Deflexiones traslacionales del aislador 1 para el ensayo TS9-S7	. 37
Figura 6-1: Componentes Horizontal, Longitudinal y Vertical de los sismos en cuestión.	. 40
Figura 6-2: Curvas de fragilidad para una aceleración de 1.5 g	. 41

RESUMEN

En sectores como la minería, los sistemas de distribución y tratamiento de agua, la producción de alimentos, textiles y en general casi toda la industria que requiere procesos en los cuales se necesita convertir la energía eléctrica en energía mecánica, son necesarios equipos de diversas características que en su mayoría producen vibraciones mecánicas. Si bien, en la mayoría de los casos, las personas que frecuentan lugares cercanos a estos equipos, se han acostumbrado a convivir con las vibraciones que estos generan, la realidad es, que es sabido que estas vibraciones afectan las estructuras que se encuentran en su área de influencia. Por otra parte, ante la presencia de eventos sísmicos, es menos sabido aun el comportamiento de este tipo de equipos en la interfaz suelo-estructura.

Teniendo en cuenta la respuesta sísmica de equipos de aire acondicionado con sistemas de control de vibraciones, un nuevo tipo de aislador sísmico y de vibraciones (ISO3DG) es desarrollado en este documento. El ISO3DG es capaz de realizar un aislamiento de doble vía. Esto significa que el sistema de aislamiento propuesto protege el entorno de las vibraciones generadas por el equipo y protege al equipo de las aceleraciones provenientes del suelo ante un evento sísmico. El ISO3DG está compuesto por tres componentes: Un armazón metálico, una serie de resortes y un sistema de disipación de energía. En esta tesis se evaluó un sistema de aislamiento para un equipo de aire acondicionado (tipo Chiller) de doce toneladas. En este escenario se evaluó la respuesta del sistema ante las vibraciones generadas por el Chiller y el mismo ante aceleraciones provenientes de un evento sísmico. A demás de esto se desarrolló un prototipo del aislador propuesto y se ensayó en el laboratorio con el fin de validar las relaciones constitutivas y ajustar los modelos teóricos.

En esta investigación se concluyó que el principal aporte de este sistema en comparación con los sistemas actuales en el mercado, yace en la reducción de las respuestas de aceleración ante eventos sísmicos de gran intensidad, esto fue validado además, a través de un análisis de fragilidad en el cual se tomó como criterio de falla una respuesta de

aceleración horizontal y en la cual se observó que al compararse con dicho sistema (actual en el mercado), hubo una reducción notoria en la probabilidad de falla del conjunto.

Palabras Claves: Tridimensional, sísmico, aislación, resortes, aislamiento de vibraciones, equipos industriales

ABSTRACT

In sectors such as mining, distribution and treatment of water, food production, and generally all industry that needs to convert electrical energy into mechanical energy, are necessary equipment of different features that generally produce mechanical vibrations. In most cases, people who frequent the environment of this equipment are used to living with the vibrations they generate, but these vibrations affect the structures within its area of influence. On the other hand, and in the presence of seismic events, it is less known even the behavior of this type of equipment in the soil-structure interface.

Based on the seismic response characteristics of air conditioning equipment with vibration controlled systems, a new type of seismic and vibration isolator (ISO3DG) is developed in this Thesis. The ISO3DG provides dual isolation. It means that the isolation system protects the environment from the vibrations of the equipment and protects the equipment from the ground accelerations in a seismic event. The ISO3DG is composed of a metal housing, a set of springs and an energy dissipation system. In this Thesis was evaluated an isolation system for a 12tons air conditioning equipment type Chiller. In this scenario is evaluated the response of the entire system in the presence of the vibrations of the Chiller and ground accelerations in seismic events. A prototype of the ISO3DG was tested in order validate the constitutive relations and to adjust the numerical models.

In this research was concluded that the main contribution of this system compared with the current systems, is the reduction in the acceleration response to high intensity earthquakes. It was also validated through fragility analysis. In this analysis it was taken as failure criterion a horizontal acceleration, and observed an important reduction in the probability of failure of the proposed system compared to traditional systems.

Keywords: Three-dimensional, seismic, isolation, springs, Vibration Isolation, Industrial Equipment

INTRODUCCIÓN

Todo equipamiento o estructura está sometida constantemente a vibraciones provenientes de su entorno. Para el caso de las vibraciones de pequeña amplitud y alta frecuencia, como las producidas por motores eléctricos o tránsito vehicular, se conoce una gran variedad de dispositivos de aislación de vibraciones (DAV). Entre los más usados podemos mencionar los apoyos elastoméricos, los apoyos de resortes, y los soportes neumáticos (Manson Industries, Barry Controls, Acrefine, Silentium, entre otros). Estos dispositivos no están diseñados para controlar vibraciones producidas por eventos excepcionales como los terremotos destructivos. En zonas de alto riesgo sísmico se usan DAV provistos de sistemas auxiliares encargados de limitar las deformaciones y absorber las fuerzas de impacto que se ocasionan durante un sismo intenso. Debido a la complejidad del fenómeno de impacto, el diseño de estos dispositivos se basa en resultados de ensayos a escala real en mesa vibradora (Fathali and Filiatrault, 2007).

En la Figura 0-1 se presentan dos ejemplos de DAV tradicionales



Figura 0-1: Sistemas tradicionales

Por otra parte, desde la década de 1980 se ha producido un gran desarrollo en relación a

sistemas de aislación sísmica (SIS). A diferencia de los DAV, los SIS sí están diseñados para absorber grandes deformaciones. Los más usados son los dispositivos elastoméricos (con y sin núcleo de plomo) y los aisladores de tipo péndulo friccional (de simple y doble curvatura) tal y como se presentan en la Figura 0-2. Aunque diferentes entre sí, ambos dispositivos producen aislación sísmica en sentido horizontal (ASH).



Figura 0-2: Aislador de goma y péndulo de fricción

Aunque la ASH provee un comportamiento excelente en la gran mayoría de las aplicaciones, existen algunos casos en que adicionalmente se requiere aislamiento sísmico en sentido vertical (ASV). Tajirian et al. (1990) propusieron dispositivos elastoméricos muy similares a los usados para ASH, con la diferencia de que las capas de elastómero no son delgadas sino gruesas. Se logra de esta manera un sistema flexible tanto en sentido horizontal como vertical, es decir aislación sísmica 3D (ASD3). Aunque simple, este sistema solo resulta apropiado para estructuras de poca altura.

La empresa alemana GERB S.A. provee desde la década 1980 un sistema ASD3 denominado GERB-BCS (Base Control System), que consiste en un conjunto de resortes helicoidales de compresión y amortiguadores viscosos sobre los que se apoya la estructura (Huffmann GK, 1985). Aunque este sistema conduce a respuestas sísmica similares a la ASH (Tornello and Sarrazin, 2003; Stuardi et al., 2007; Tornello and Frau, 2010), su penetración en el mercado ha sido sustancialmente menor.

Suhara et al. (2002) desarrollaron un ASD3 que combina un aislador elastomérico en sentido horizontal, con un sistema de aire comprimido en sentido vertical tal y como se presenta en la Figura 0-4. Suhara et al. (2002) usaron un enfoque fundamentalmente experimental, donde se expusieron los resultados de un prototipo a escala (1/10) que tendría la finalidad de ser parte del sistema de aislamiento de una planta de energía nuclear. El dispositivo está compuesto por: (1) una recamara de aire en la parte inferior del mismo, (2) un sistema de fijación que permite definir el tipo de contacto con la estructura a aislar, y (3) un aislador de elastomérico muy similar a los empleados en los sistemas de aislamiento horizontal. El programa de ensavos empieza con la cámara de aire (que en este caso se ocupa agua). Posteriormente se incorpora el sistema de fijación, y finalmente termina con la inclusión del aislador elastomérico. Ya con la configuración final terminada se realizan ensayos de cargas sinusoidales verticales con una carga horizontal fija y viceversa. De esta investigación se concluyó que el dispositivo es aplicable para el sistema de aislamiento sugerido, no obstante, se recomienda verificar las presiones en la cámara de aire y el contacto en las uniones para modelos más grandes, ya que el prototipo fabricado fue a escala 1/10 y podrían existir posibles efectos de escala.



Figura 0-3: Dispositivo usado por Suhara et al. (2002)

Li et al. (2011^a, 2011b, 2013) desarrollaron un dispositivo para aislamiento tridimensional que combina placas deslizantes teflón-acero, resortes helicoidales en la dirección horizontal, y resortes de disco en la dirección vertical. Luego de validar los cálculos iniciales del dispositivo, se realizó un modelo numérico para su aplicación en hangares de grandes luces (Li, 2013). De este análisis se concluyó que el mayor aporte de estos dispositivos a esta estructura (Hangar evaluado) estuvo en la reducción de las respuestas de aceleración y fuerza vertical.



Figura 0-4: Configuraciones ensayadas Li et al. (2003)

Zhao et al. (2011) propusieron un dispositivo que combina los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en sentido horizontal, y resortes de disco (Belleville) en sentido vertical. Este dispositivo nació de la necesidad de complementar los aisladores de goma tradicionales (con núcleo de plomo) adicionando flexibilidad en la dirección vertical de los mismos. Los resortes de disco tienen entonces la finalidad de recibir las cargas por peso propio y generar aislamiento en sentido vertical. En los resultados obtenidos se aprecia que si bien, los mayores aportes del dispositivo yacen en el aislamiento horizontal, el mismo genera un aislamiento vertical aceptable.

Es importante destacar que los aisladores sísmicos (tanto 2D como 3D) no están diseñados para trabajar como aisladores de vibraciones, ya que se activan frente a sismos de mediana

a gran intensidad. Es decir, que para sismos menores y vibraciones de servicio los aisladores sísmicos se comportan como apoyos rígidos.

Esta investigación presenta un sistema no-lineal de aislación tridimensional de vibraciones, diseñado tanto para vibraciones de pequeña amplitud y alta frecuencia (condición de servicio) como también, y especialmente, para controlar vibraciones producidas por terremotos de gran intensidad. La idea seminal fue propuesta por Almazán et al. (2007) bajo la denominación de aislación rotacional-vertical (VRI), en la que se asumió comportamiento lineal del sistema.

1. DISPOSITIVO DE AISLACIÓN PROPUESTO

El dispositivo en el cual se basa el sistema de aislación propuesto consiste de tres partes: (1) una carcasa metálica; (2) un conjunto de resortes; y (3) un sistema de disipación de energía. La carcasa consiste en un conjunto de seis placas rígidas articuladas, las que conforman un prisma hexagonal con 3 grados de libertad: translación de la placa superior en las direcciones V (vertical), T (transversal), y rotación en torno a el eje L (longitudinal). La Figura 1.1(a) muestra una vista esquemática de la carcasa en configuración deformada y no deformada. Por otra parte, en la Figura 1.1b se presenta el dispositivo con todos sus componentes.

Los resortes, que proporcionan la acción restitutiva, se pueden clasificar a su vez como verticales y horizontales. Los resortes verticales proveen la flexibilidad necesaria para aislar vibraciones, mientras que los resortes horizontales se encargan de limitar la deformación debida al peso propio de la estructura.



Figura 1-1: a. Esquema del aislador (1) condición deformada y (2) condición indeformada, b. Aislador Completo, c. Armazón

1.1 Relaciones fuerza-deformación elástica en sentido vertical

Para determinar las relaciones fuerza-deformación vertical debido a los resortes, es necesario considerar las siguientes hipótesis: (i) las placas se comportan como cuerpos rígidos, y (ii) los resortes mantienen un comportamiento lineal elástico. Llamaremos $q = [u, v, \theta]^T$ el vector de gados de libertad, donde **u** y **v** son respectivamente el

desplazamiento vertical y transversal del centro geométrico de la placa superior (horizontal) del dispositivo y Θ la rotación sobre el eje longitudinal. Aplicando el principio de trabajos virtuales, la fuerza generalizada en dirección vertical f_u aportada por cualquier tipo de resorte y la rigidez tangente $k_u = \frac{\partial f_u}{\partial u}$ se puede expresar como:

$$f_{u} = (k_{s}s + f_{o})\frac{\partial s}{\partial u}$$
(1.1)
$$k_{u} = (k_{s}s + f_{o})\frac{\partial^{2}s}{\partial u^{2}} + k_{s}\left(\frac{\partial s}{\partial u}\right)^{2}$$
(1.2)

Donde *s* y k_s son respectivamente la deformación y la rigidez del resorte; y f_o la fuerza de pre-tensión (si existiese). Para facilitar la interpretación física y el diseño de este dispositivo, se han obtenido expresiones analíticas a dimensionales para fu y k_u tanto para los resortes horizontales como los verticales. Estas expresiones se presentan en la Tabla I-1.

	Resortes Horizontales	Resortes Verticales
Deformación	$s(u) = 2(\beta - \beta_o)H_o$ $\beta = \frac{b(u)}{H_o} = \left(\beta_o^2 - \frac{a}{2} - \frac{a^2}{2}\right)^{1/2}; \beta_o = \frac{b_o}{H_o}$ $\hat{u} = \frac{u}{H_o}$	s = u
Jacobiano, $\frac{\partial s}{\partial u}$	$-\frac{1+\hat{a}}{2\beta} < 0$	1
Hessiano, $\frac{\partial^2 s}{\partial u^2}$	$-\frac{1}{H_o}\left(\frac{1}{2\beta}+\frac{(1+a)^2}{8\beta}\right)<0$	0
Fuerza Normalizada, $\hat{f}_u = \frac{f_u}{k_s H_o}$	$-\left(1 - \frac{\beta_o}{\beta} + \frac{\hat{f}_o}{2\beta}\right)(1 + \hat{u})$ $\hat{f}_o = \frac{f_o}{k_h H_o}$	-
Rigidez Normalizada, $\hat{k}_u = \frac{k_u}{k_h H_o}$	$-1\left(1 - \frac{\beta_o}{\beta} + \frac{\hat{f}_o}{2\beta} - 2\beta - 2\beta_o + \hat{f}_o\right)$ $\frac{(1+a)^2}{8\beta^3} + \frac{(1+a)^2}{4\beta_o^2}$	1

Tabla 1-I: Relaciones fuerza-Deformación de los resortes

Con dichas expresiones se realizó una representación gráfica que se presenta en la Figura 1.2. En esta, la línea azul corresponde al aporte del resorte vertical, la línea roja a los horizontales y la negra a la combinación de ambas. La magnitud se realizó en base a uno de los tipos de aisladores que se evaluarán más adelante.



Figura 1-2: Relación constituvia en la dirección vertical

Las relaciones teóricas de los resortes y el aislador como un todo fueron validadas a través de ensayos en el laboratorio del departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica y se encuentran en los anexos 1 y 2.

1.2 Relaciones Fuerza-Deformación elástica en sentido horizontal

La relación esfuerzo-deformación en la dirección horizontal débil, dependerán de la rigidez horizontal (a corte) de los resortes verticales. Para esto se realizó un modelo de elementos finitos con las dos configuraciones de resortes verticales en el software ANSYS. En ambos modelos se analizó el comportamiento de los dos resortes verticales sometidos a corte, se fijó la base de ambos resortes y se verificó la fuerza de corte en función del desplazamiento. En la Figura 1-3 se presentan los modelos de ambas configuraciones, los colores presentes simbolizan los desplazamientos globales de los cuerpos evaluados, donde en este caso el azul es desplazamiento cero y el rojo es el desplazamiento máximo (más de 50 mm).



Figura 1-3 a. Modelo con un solo resorte, b. Modelo con dos resortes

En este, se encontró que la rigidez horizontal es aproximadamente un 46 % de la rigidez vertical (solo de los resortes verticales) y permanecerá en un rango lineal hasta 9 cm. Para el caso de la dirección 3 (dirección horizontal fuerte), se contará con una relación constitutiva bilineal, ya que se tendrá una rigidez inicial débil (cercana a cero) con un recorrido de 10 mm (gap) y posterior a esto la rigidez producto de la resistencia de las piezas del aislador en la dirección fuerte. Con la información anterior se determinan las constitutivas de las direcciones horizontales del movimiento.

En los análisis realizados, se encontró que, en estos sistemas, los resortes topan primero durante movimientos traslacionales que rotacionales, es por esto, que se asumió que el comportamiento rotacional de cada aislador mantendrá una rigidez lineal. En la Figura 1.4, se presentan las constitutivas de las direcciones horizontales del movimiento para un tipo de aislador que se evaluará más adelante. En este caso la línea negra corresponde a la dirección rígida del movimiento y la azul en la dirección flexible



Figura 1-4 Constitutivas Horizontales tipo

1.3 Relaciones Fuerza-Deformación Disipador de energía

El disipador de energía considerado será de tipo ficcional y tendrá forma de cuña. En la imagen a continuación se muestra una representación del disipador.



Figura 1-5Esquema disipador friccional

Ante esta configuración, las variables serán: Ancho máximo (Amax, Horizontal en la parte superior de la imagen), Ancho mínimo (Amin, Horizontal en el contacto de la cuña con las placas de sujeción), Longitud libre (Llibre, Tramo recto vertical de la cuña), Longitud inclinada (Linc, Tramo inclinado vertical de la cuña) Por otra parte, tomando las placas

como un cuerpo elástico, la rigidez del mismo estará dada por: $k_e = 3EI / L^3$, donde $I = (d * e^3)/12$, *e* es el espesor y d es la longitud de las placas fuera del plano. Con esta información se obtiene que la fuerza de penetración y la fuerza de extracción serían:

$$F_{p} = 2(k_{e} * \tan \varphi * \tan(\varphi + \tan \mu)) * \delta$$
(1.3)
$$F_{p} = 2(k_{e} * \tan \varphi * \tan(-\varphi + \tan \mu)) * \delta$$
(1.4)

Donde ϕ y μ son el ángulo de inclinación interior de la cuña y el coeficiente de roce dinámico, respectivamente. En la Figura 1.5 se presenta una relación constitutiva típica producto del desarrollo de las ecuaciones 1.3 y 1.4.



Figura 1-6Constitutiva Conceptual del disipador

Finalmente el dispositivo es construido tal y como se presenta en la Figura 1-7



Figura 1-7 Vista isométrica del dispositivo

2. DISPOSITIVO DE REFERENCIA

El sistema de aislamiento que servirá de comparación, se presenta en la Figura 2.1. Este está compuesto por cuatro aisladores que se componen dos resortes helicoidales de compresión, y un conjunto de elementos restrictivos de goma.

Este sistema fue tomado del articulo *Experimental sismic performance evaluation of isolation/restraint systems for mechanical equipment. Part 1: Heavy equipment study. Technical Report MCEER-07-0007(2007) publicado por Fathali S. and Filiatrault A.*

De ahora en adelante: el artículo de referencia



Figura 2-1 Figura 3-5 Articulo de referencia

La finalidad de este sistema consiste en ocupar los topes de goma ante demandas sísmicas, la mayor parte del recorrido del resorte está destinada a la deformación por peso propio y a las vibraciones durante la etapa de servicio.

Referente a las rigideces verticales y horizontales de cada aislador, se tiene la siguiente tabla que corresponde a la Tabla 3-3 del artículo de referencia.

	1.0 g De	esign	3.0 g Design		
Direction	Without Impact	With Impact	Without Impact	With Impact	
Horizontal	206[1174]	8787[50174]	206[1174]	11589[66174]	
Vertical	614[3500]	8669[49500]	613[3500]	11646[66500]	

Tabla 2-I: Tabla 3-3(Fathali and Filiatrault, 2007) Rigideces horizontales y verticales (unidades kN/m [lb/in]

Se puede apreciar entonces que la rigidez durante las cargas de servicio (sin impacto) es distinta a la rigidez ante cargas eventuales (con impacto). El recorrido (Gap) que diferencia el estado sin impacto del estado con impacto es ajustable en el dispositivo luego de sufrir la deformación por peso propio. En los ensayos realizados, se evaluaron recorridos de 3 mm, 6 mm, 11 mm y 12 mm tanto para el gap vertical como para los horizontales. Con esta información, se tendrían entonces las constitutivas vertical y horizontales (iguales ambas horizontales) que se muestran en la Figura 2.2.



Figura 2-2: Constitutivas del sistema de referencia

Tal y como se explicó anteriormente, los ajustes de los recorridos se realizan luego de la aplicación del peso propio, es por esto que en las constitutivas verticales se tiene una deformación inicial y posterior a esta un cambio en la constitutiva vertical del sistema.

3. MODELOS CONSIDERADOS

El equipo considerado en este estudio tiene un peso de 11990 kg. Dicho equipo lo llamaremos de ahora en adelante como CLC por sus siglas en inglés (Centrifugal Liquid Chiller). Está compuesto por un evaporador, un condensador, un centro de control (OCC), un modificador de la velocidad del motor (VSD), un compresor, el motor y una bomba de aceite. Tal y como se muestra en la Figura 3.1. Este equipo está inmerso en un armazón metálico con dimensiones brutas de 5456 mm de largo, 2108 mm de ancho y 2877 mm de alto tal y como se muestra en las Figuras 2-2 y 2-3 del artículo de referencia (Fathali and Filiatrault, 2007)



Figura 3-1: Figura 2-2 (Fathali and Filiatrault, 2007) Componentes del Equipo



Figura 3-2: Figura 2-3 (Fathali and Filiatrault, 2007) Dimensiones del Equipo

3.1 Modelo M1: Equipo con aisladores convencionales

3.1.1 Orientación en Planta

Teniendo en cuenta que los aisladores de este sistema tienen la misma rigidez en ambos sentidos horizontales, resulta indiferente la orientación de los mismos.

3.1.2 Formas Modales

Con el fin de identificar el sistema en cuestión y según lo visto en el articulo de referencia (Fathali and Filiatrault, 2007), el sistema de referencia tendría las siguientes formas modales

#1 Wf(Hz)		1.17		#4 Wf(Hz)		2.78	
	1	0			1	1	90
Ы	2	1		믹	2	-0.32	
el g	3	0		elg	3	0	
sp r	4	0		sp r	4	-0.01	× ×.
De	5	0	3- <u>3</u> - x	De	5	-0.002	- <u>6</u> -
	6	-0.004			6	0	
#: Wf(2 Hz)	1.54		#5 Wf(I	5 Hz)	3.48	
	1	0	A Str.		1	1	N. See
Ъ	2	0		Desp rel gdl	2	0.33	0×
el 6	3	1			3	0.8	
sp r	4	0			4	-0.004	\$¥ \$¥2
De	5	0.002			5	-0.025	
	6	0.003			6	0.014	
#3 Wf(3 Hz)	2.24		#6 Wf(I	5 Hz)	3.8	
	1	1			1	0.65	200
ld	2	0		lb	2	1	24
el 6	3	-0.1		el 6	3	-0.16	
ı ds:	4	0		l ds:	4	9E-04	375 2
De	5	0		De	5	0.003	
	6	0			6	0.047	

Tabla 3-I: Formas modales del sistema de referencia

Es preciso aclarar que los valores de los modos de vibración (del sistema del artículo de referencia), corresponden a las mediciones presentadas en dicho artículo. A demás de esto, a cada modo de vibración (del mismo sistema) se le reemplazaron por cero los dos ´últimos valores. Esto con el fin de hacer más clara la identificación de las formas.

Esta información sirvió además para ajustar el modelo numérico (del sistema de referencia) desarrollado.

3.1.3 Funciones de respuesta en frecuencia

Dado que la mayoría de los equipos ocupados en la industria de la refrigeración vibran en un rango de frecuencias de entre 10hz y 50hz, se someterá la estructura a un rango de frecuencias de entre 0hz y 50hz con el fin de evaluar su comportamiento. Es decir, se realizó un barrido de frecuencias en los ejes X, Y y Z (de forma independiente) con lo cual se logró (además) validar la identificación del sistema tal y como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3-3: Funciones de respuesta e frecuencia del sistema de referencia, Aceleraciones absolutas

3.1.4 Condición Inicial

Al momento de montar la estructura a aislar sobre este sistema, los resortes helicoidales a compresión, sufren una deformación por peso propio de alrededor de 48 mm, posterior a esto, su recorrido es limitado (de forma manual) 3 mm, 6 mm, 11 mm o 12 mm dependiendo del caso, tal y como se presenta en la Figura 3.4 (referencial)



Figura 3-4: Efecto de la aplicación del peso propio

Por otra parte, y en comparación a lo visto en la sección 2.1.3, los sistemas en cuestión tendrán comportamientos distintos. En la imagen a continuación se presenta una imagen referencial que presenta los comportamientos (verticales) de los aisladores ante una carga horizontal sobre el centro de masa del equipo.



Figura 3-5: Efecto de la aplicación de una carga horizontal

3.2 Modelo M2: Equipo con Aisladores ISO3D

Como se explicó anteriormente, el sistema propuesto está compuesto por uno o más resortes trabajando a compresión y dos resortes trabajando a tracción. La disipación de energía se realiza (principalmente) a través de un disipador friccional (sección 1.3) el cual puede ocuparse o no dependiendo del caso. Para el sistema que se está evaluando en este documento se decidió ocupar un disipador friccional ubicado en cada uno de los cuatro aisladores que componen el sistema de aislamiento. Dicho sistema (como ya se explicó) aislara un equipo de alrededor de 12 ton, de manera que se espera que cada aislador reciba una cuarta parte de esta carga por peso propio. Bajo esta consigna se han propuesto dos sistemas de aislamiento (con dos configuraciones de aislador distintas) que se presentan a continuación.

Sistema flexible con gap Horizontal

Cada aislador de este sistema está compuesto por un resorte vertical, dos resortes horizontales y un sistema de libre desplazamiento lateral de 10 mm en el sentido rígido del aislador.

Sistema rígido con gap Horizontal

Cada aislador de este sistema está compuesto por un resorte vertical, dos resortes horizontales y un sistema de libre desplazamiento lateral de 10 mm en el sentido rígido del aislador.

Las relaciones constitutivas de estas configuraciones se presentan en la Figura 3.6



Figura 3-6: Relaciones constitutivas de los sistemas propuestos

3.2.1 Orientación en Planta

Tal y como se usó en el sistema de referencia, para el sistema propuesto se aislara la estructura con cuatro dispositivos ubicados en las cuatro esquinas (vista en planta) del equipo de aire acondicionado. Dado que en el sistema propuesto, las rigideces horizontales son muy distintas entre sí, resulta importante definir la orientación de dichos aisladores con el fin de obtener el resultado deseado.

La distribución propuesta en planta es la que se presenta en la imagen a continuación:



Figura 3-7: Orientación de los ejes locales de los aisladores

Como se puede apreciar, se tiene una distribución cruzada que facilita los giros respecto a los ejes horizontales.

3.2.2 Formas Modales

Para este análisis se supondrá que cada aislador recibe una cuarta parte de la carga producto del peso propio del equipo, dicha carga generará un desplazamiento vertical del aislador de 36 mm. Con esta información se supondrá que los desplazamientos verticales del aislador producto de la carga impuesta por el motor serán inferiores a 10 mm. Partiendo de estos supuestos, el comportamiento del aislador en la dirección z, estará enmarcado en el tramo entre líneas verdes que se muestra a en la figura a continuación.



Figura 3-8: Comportamiento esquemático del aislador en condiciones de servicio

Sabiendo esto, resulta valido afirmar que se tendrá un comportamiento lineal del sistema en las condiciones de servicio. Con esta información es posible estimar los modos de vibración para el sistema de aislamiento propuesto que se encuentran representados a continuación en las formas modales de la Tabla III-2 (incluyendo sus frecuencias fundamentales Wf).

-							
#1 Wf(Hz)		1.40	1.40		⊧ Hz)	3.36	
	1	0			1	0	
dl	2	1		el gdl	2	0	
el g	3	0			3	0.73	
sp r	4	0		sp r	4	0	
Des	5	0	3- 5- 12	Des	5	-1	2
	6	-0.68			6	0	
#2 Wf(2 Hz)	2.0		#5 Wf(I	; Hz)	3.37	
	1	0	A Street		1	0	1000
gdl	2	0		gl	2	0.72	
el g	3	-1	t.		3	0	The second second
sp r	4	0		Desp 1	4	0	374-2
De	5	-0.23	• • •		5	0	
	6	0			6	1	
#3 Wf(3 Hz)	2.05		#6 Wf(I	; Hz)	3.74	
	1	1			1	0	
lb	2	0		g	2	0	
Desp rel g	3	0	Star In				
	4	0	3 3 3 5 2 2	sp r	4	1	
	5	0		De	5	0	v.
	6	0			6	0	

Tab	la	3-I	I:	Formas	moda	les d	del	sistema	propuesto
-----	----	-----	----	--------	------	-------	-----	---------	-----------

3.2.3 Funciones de respuesta en frecuencia

Tal y como se realizó para el sistema M1, se presenta a continuación las funciones de respuesta en frecuencia para el sistema propuesto.



Figura 3-9: Funciones de respuesta e frecuencia del sistema de propuesto, Aceleraciones Absolutas

Como se puede ver, las frecuencias fundamentales del sistema se encuentran en un rango distinto en el que vibran estos equipos (10hz a 50hz) de esta forma se entiende que el dispositivo no sufre grandes deformaciones (producto del fenómeno de resonancia) y en consecuencia funciona como aislador de vibraciones.

3.2.4 Condición Inicial

Al momento de montar la estructura a aislar sobre el sistema propuesto, este sufre una deformación vertical por peso propio (de alrededor de 36 mm) pero no tiene ninguna intervención adicional tal y como se realiza en el sistema de referencia. En la figura a continuación se expresa de forma cualitativa la diferencia antes mencionada.


Figura 3-10: Efecto de la aplicación del peso propio

Por otra parte y en comparación a lo visto en la sección 3.1.2 los sistemas en cuestión tendrán comportamientos distintos. En la imagen a continuación (tal y como se presentó para el sistema M1) se presenta una imagen referencial que simula los comportamientos (verticales) de los aisladores ante una carga horizontal sobre el centro de masa del equipo.



Figura 3-11: Efecto de la aplicación de una carga horizontal

4 EXCITACIONES

Tal y como aparece en el artículo de referencia (Fathali and Filiatrault, 2007), a los sistemas se les aplicará una serie de excitaciones sísmicas según lo dicta el protocolo de pruebas del IBC2003 y AC156. Según esto, las excitaciones sísmicas deben escalarse al espectro presentado en la Figura 5-2 del artículo en cuestión.



Figura 4-1: Figura 5-2 (ref) Espectro teórico según el protocolo

Donde:

 A_{FLX} = Aceleración espectral horizontal calculada para un equipo flexible

 A_{RIG} = Aceleración espectral horizontal calculada para un equipo rígido

z = Altura de nivel en el cual se localiza el equipo respecto a la base de la estructura.

h = Altura del techo de la estructura respecto a la base.

 S_{DS} = Espectro de aceleración para periodos cortos con cinco por ciento de amortiguamiento.

 S_{D1} = Espectro de aceleración para un periodo de un segundo con cinco por ciento de amortiguamiento.

Dado que, en el artículo de referencia se pretendió evaluar el sistema de aislamiento en la base del edificio y en el techo del mismo, la Tabla IV-1 tiene los valores de las variables anteriores para cada caso.

Tabla 4-I. Tabla 5-1(Fathali and Filiatrault, 2007) Parámetros para la generación del espectro teórico para los casos base y techo

Equipment Location	A _{FLX}	A _{RIG}	f _{FLX}	ſo
Base Level	1.0g	0.4g	1.66 Hz	8.33 Hz
Roof Level	1.6g	1.2g	1.33 Hz	8.33 Hz

Por otra parte, la Tabla IV-2 presenta los PGA máximos en las tres direcciones del movimiento.

 Tabla 4-II. Tabla 5-2(Fathali and Filiatrault, 2007)
 Aceleraciones punta de ajuste para sismos sintéticos

Synthetic	Pe	ak Acceleration	(g)
Ground Motion	Transverse	Longitudinal	Vertical
Base Level	0.47	0.45	0.32
Roof Level	0.80	0.79	0.53

Con esta información, se procedió a generar una serie de sismos sintéticos para cada caso, con las características antes mencionadas. Dichos sismos fueron generados según la metodología presentada por Clough & Penzien (1993). Este análisis aun no corresponde a un análisis de fragilidad sísmica. El análisis de fragilidad sísmica se realizará más adelante y estará basado en aceleraciones sísmicas provenientes de sismos ocurridos en Chile (reales).

En la Figura 4.2 se presentan los espectros generados en base a la información anterior. Es claro que los espectros del techo presentan una aceleración mayor producto de las

amplificaciones generadas por la estructura (edificación en este caso). Se puede verificar también que las aceleraciones horizontales corresponden a un tercio de la aceleración vertical. Esto es una convención tomada por la norma en cuestión. Más a delante en el análisis de fragilidad sísmica, se tomarán valores reales de componentes verticales (de sismos chilenos).



Figura 4-2: Espectros generados en base a la información antes descrita

Con la información anterior, se desarrollaron dos sismos (cada uno con las tres direcciones del movimiento) compatibles con los espectros anteriores. Uno simula las aceleraciones en la base de la edificación y otro las aceleraciones en el techo de la misma. Estos se presentan a continuación



Figura 4-3: Sismo sintético nivel techo



Figura 4-4: Sismo sintético nivel base

5 RESULTADOS ANÁLISIS DINÁMICO

Esta es quizá la función más importante de este sistema de aislamiento y la mayor contribución de este trabajo. El sistema de aislamiento ISO3DG fue concebido como un sistema de aislamiento de doble vía que aparte de aislar el entorno de las vibraciones mecánicas del equipo, fuera capaz de proteger la estructura ante eventos sísmicos. En esta sección se analizará el comportamiento de todo el sistema teniendo en cuenta la no-linealidad elástica de la constitutiva de la rigidez vertical de cada uno de los aisladores (propuestos). Para esta labor se ocupó el integrador ODE15s del software Matlab.

Antes de esto, resulta importante mencionar que el aislador de referencia y el aislador propuesto tienen comportamientos estructurales distintos. El sistema de referencia tiene un sistema de topes sísmicos, los cuales reaccionan ante una carga sísmica o cualquier excitación superior a las vibraciones de servicios para las que fue calibrado el sistema. Es por esto que el sistema de referencia se modeló con constitutivas bilineales en las tres direcciones traslacionales del movimiento. Por otra parte, el sistema propuesto y teniendo en cuenta que fue diseñado a demás para este fin, cuenta con constitutivas lineales (dirección débil) bilineales (dirección fuerte) y no lineales (en la dirección vertical del movimiento) tal y como se presenta en la sección 1.

Teniendo en cuenta toda la información obtenida hasta ahora, resulta viable modelar la respuesta sísmica de ambos sistemas.

5.1 Respuestas comparativas entre los sistemas flexible y rígido

Antes de comparar el sistema propuesto con el sistema de referencia, se decidió realizar una evaluación previa en la cual se ocupen los dos sistemas propuestos (antes de seleccionar uno como el propuesto en esta investigación).

Es decir, las configuraciones del sistema propuesto flexible (M2a), propuesto rígido (M2b) y el sistema de referencia (M1) fueron sometidos a una excitación sísmica (sismo en la

base en este caso) con el fin de revisar sus respuestas (en el centro de masa) de aceleración y desplazamiento. Dichos resultados preliminares se presentan en la Tabla 5-1.

Sistema	Modelo	Ace Ab	eleracior solutas (nes (g)	Desp Rel	olazamie ativos (e	entos cm)	
		Х	У	Z	Х	у	ntos m) Z 0.85 2.38 3.66	
Modelo M1		2.62	2.21	1.62	2.28	1.36	0.85	
Modelo M2a	1 RV	0.99	1.28	0.36	3.4	1.35	2.38	
Modelo M2b	2 RV	1.19	1.27	0.56	4.69	1.84	3.66	

Tabla 5-I: Comparativa

Analizando los sistemas propuestos, (tal y como se esperaría) el sistema más rígido (M2b) tiene aceleraciones mayores al sistema flexible en las tres direcciones. Por otra parte resulta importante mencionar que los desplazamientos máximos del sistema más rígido también son mayores. Con el fin de analizar este resultado de una mejor manera, y teniendo en cuenta que la ´única diferencia entre ambos sistemas de aislamiento son las constitutivas verticales de los aisladores, se verificó el comportamiento de los desplazamientos verticales de cada aislador en función de la fuerza en ambos casos.



Figura 5-1: Comparativo configuraciones M2a y M2b

En la imagen anterior, se aprecia entonces la razón por la cual se presentan mayores desplazamientos en el sistema más rígido. Se aprecia que en este sistema (con dos resortes verticales) se generan levantamientos en los aisladores producto de las aceleraciones generadas por la rigidez de este sistema. Ante esta situación, es claro que el sistema que deberá usarse será el flexible, el cual se comporta de una mejor manera y facilita además la instalación del disipador friccional de energía.

5.2 Evaluación de la respuesta ocupando algunas excitaciones usadas en los ensayos del artículo de referencia.

En el artículo de referencia (Fathali and Filiatrault, 2007) se presentan todos los resultados obtenidos de los ensayos realizados. Para este análisis, se ocupará solo parte de dicha información que será orientada a comparar los comportamientos de ambos sistemas.

Como se mencionó anteriormente, aparte del sistema propuesto, se desarrolló un modelo numérico que simula en comportamiento del sistema de referencia y que fue ajustado con la información reportada en los ensayos realizados en el artículo de referencia. Este modelo comprende además la disposición 1 g y 3 g. La disposición 1 g está pensada para los análisis de la estructura sometida a sismos de base (menor intensidad) y la condición 3 g está pensada para sismos de techo (mayor intensidad). La diferencia real entre ambos sistemas radica en la rigidez de los aisladores al entrar en funcionamiento los topes de goma.

En las tablas a continuación, se presentan las respuestas de aceleración y desplazamiento de los sistemas de referencia y el sistema seleccionado propuesto (aisladores con un resorte vertical con gap horizontal).

Ensayo Disposició	Disposición	Dil (mm)	Dil gor		Tubo goma		Aceleración		Respuesta sistema de referencia (mm)			Respuesta sistema propuesto (mm)		
		()	Esp.	Dur.	Amp.	Niv.	Х	Y	Ζ	Х	Y	Ζ		
TS10- S4		11	19	60	10%	Base	11,7	7,2	3,3	6,4	7,7	6,1		
TS2-S1	Base	6	C	60	50%	Base	23,6	15,1	7,8	10,2	12,6	2,7		
TS2-S7		0	0	00	100%	Techo	35,5	21,8	13,5	41	18,9	20,2		
TS4-S5		3			10%	Base	11,6	7,6	4,7	6,4	7,7	6,1		
TS5-S1	Techo	6	6	6 60	50%	Techo	13,2	10,3	7,7	22,5	13,4	6,5		
TS9-S7		6			100%	Techo	22,9	15,6	10,5	41	18,9	20,2		

Tabla 5-II: Respuestas máximas de desplazamiento del centro de masa

Tabla 5-III: Respuestas máximas de aceleración del centro de masa

Ensayo Disposició	Disposición	Dil (mm)	Tubo goma		Aceleración		Respuesta sistema de referencia (g)			Respuesta sistema propuesto (g)		
		(IIIII)	Esp.	Dur.	Amp.	Niv.	Х	Y	Z	Х	Y	Ζ
TS10- S4		11	19	60	10%	Base	1,48	1,32	1,07	0,64	1,26	0,21
TS2-S1	Base	Base	6 6	60	50%	Base	0,41	0,42	0,22	0,25	0,48	0,02
TS2-S7		0	0	00	100%	Techo	5,07	4,15	3,05	1,67	2,33	0,86
TS4-S5		3			10%	Base	0,66	0,38	0,3	0,25	0,48	0,02
TS5-S1	Techo	6	6	60	50%	Techo	1,79	1,92	1,15	0,88	1,42	0,51
TS9-S7		0			100%	Techo	4,87	3,3	2,52	1,67	2,3	0,86

Se puede apreciar entonces que ante excitaciones bajas (ensayos TS4-S5 y TS10-S4) el sistema propuesto tiene respuestas de deformaciones similares (o incluso menores) al sistema de referencia y tiene además aceleraciones inferiores al sistema de referencia. Por otra parte, para excitaciones altas (ensayos TS9-S7 y TS2-s7) el sistema propuesto tiene respuestas de aceleración inferiores al sistema de referencia, pero respuestas de desplazamientos superiores.

A modo de ejemplo y con el fin de validar lo anteriormente descrito, se tomaron las respuestas de los sistemas producto de la excitación TS9-S7, la cual corresponde al 100% de la excitación del techo. Dichas respuestas (las que corresponden con los valores de TS9-

S7 de las tablas anteriores) se presentan en las Figuras 5.2 y 5.3. Si bien cierto, ambos sistemas tienen desplazamientos relativamente similares en el centro de masa (siendo mayores los del sistema propuesto), es claro que el mayor aporte del sistema propuesto está en la reducción de aceleraciones del sistema, tal y como se aprecia en la Figura 5.3.



Figura 5-2: Deflexiones traslacionales para el ensayo TS9-S7



Figura 5-3: Aceleraciones traslacionales para el ensayo TS9-S7

Por otra parte, analizando lo que sucede en uno de los aisladores, veremos las siguientes respuestas



Figura 5-4: Deflexiones traslacionales del aislador 1 para el ensayo TS9-S7

Se aprecia entonces que el aislador 1 (propuesto) tiene un comportamiento con mayor periodo y amplitud que el aislador del sistema de referencia. Producto de esto, sufre un ligero levantamiento (inferior a 2cm) el cual se considera aceptable ante un evento sísmico de esta magnitud (el más fuerte de los ensayos)

6 ANÁLISIS DE FRAGILIDAD SÍSMICA

Con el fin de ampliar el rango de demanda sísmica en el sistema, generando así mayor confiabilidad en este como un todo, se realizó un análisis de fragilidad sísmica. Cabe aclarar que este análisis solo busca generar una referencia sobre el comportamiento del sistema de aislamiento propuesto con el sistema de referencia y no un análisis detallado de todos los tipos de daños plausibles en el equipo que se busca aislar.

Teniendo en cuenta el tipo de estructura a analizar, resulta importante incorporar la componente vertical del sismo ya que este tipo de equipos son sensibles tanto a las aceleraciones horizontales como las verticales. Para este análisis, se usaron 22 registros (con las tres componentes), dichos registros provienen de cuatro eventos (todos sismos de subducción) presentados desde el año 1985 a 2010. Estos son: Algarrobo 1985 (Diaz Labé, 2009), Tarapacá 2005 (Boroschek, Soto and Leon, 2005), Tocopilla 2007(Boroschek, Soto and Leon, 2007) y El Maule 2010 (Boroschek, Soto and Leon, 2010).

Los valores máximos de aceleración horizontal varian entre 0.3g y 0.93g mientras que las verticales están en un rango entre 0.16g y 0.87g

La información básica (para los análisis) de estos sismos se presenta en las Tablas 6-I, 6-2, 6-III y 6-IV.

Sismo Algarrobo 1985, Mw=7.8										
Estación	Componentes	PGA[g]	Estación	Componentes	PGA[g]	Estación	Componentes	PGA[g]		
	190°	0.35		10°	0.71		0°	0.69		
Llayllay		0.47	Llolleo	100°	0.44	Melipilla	90°	0.53		
	Vertical	0.23	Sismo Algarrobo 1985, Mw=7.8Sismo Algarrobo 1985, Mw=7.8EstaciónComponentesPGA[g]EstaciónCompone10°0.710°Llolleo100°0.44Melipilla90°Vertical0.86VerticalSan Isidro90°0.71VerticalVertical0.40.40.4	Vertical	0.25					
a	170°	0.31	q	0°	0.72					
San Felipe	80°	0.43	San Isidro	90°	0.71					
renpe	Vertical	0.2	131010	Vertical	0.4					

Tabla 6-I: Algarrobo

Tabla 6-II: Tarapacá

	Sismo Tarapacá 2005, Mw=7.8								
Estación	Componentes	PGA[g]	Estación	Componentes	PGA[g]	Estación	Componentes	PGA[g]	
	Longitudinal	0.43		Longitudinal	0.77		Longitudinal	0.39	
Cuya	Transversal	0.44	Pica	Transversal	0.73	Pucon	Transversal	0.32	
	Vertical	0.23		Vertical	0.54		Vertical	0.22	

Tabla 6-III: Tocopilla

	Sismo Tocopilla 2007, Mw=7.7									
Estación	Componentes	PGA[g]	Estación	Componentes	PGA[g]	Estación	Componentes	PGA[g]		
	Longitudinal	0.42		Longitudinal	0.5		Longitudinal	0.34		
Mejillones	Transversal	0.41	Tocopilla	Transversal	0.59	Tocopilla Puerto	Transversal	0.35		
	Vertical	0.34		Vertical	0.57	i ucito	Vertical	0.16		

Tabla 6-IV: El Maule

			Sismo M	aule 2010, Mw=	8.8			
Estación	Componentes	PGA[g]	Estación	Componentes	PGA[g]	Estación	Componentes	PGA[g]
	Longitudinal	0.33		Longitudinal	0.18		Longitudinal	0.3
Viña el Salto	Transversal	0.35	Viña Centro	Transversal	0.33	Valparaiso UTFSM	Transversal	0.13
Suite	Vertical	Sismo Maule 2010, Mw=8.8ientesPGA[g]EstaciónComponentesPGA[g]EstaciónCompodinal0.33Viña CentroTransversal0.33Valparaiso UTFSMTransvcal0.26Vertical0.21Valparaiso UTFSMVerticaldinal0.26Vertical0.21Vertical0.21dinal0.22VallenarTransversal0.02ValdiviaTransvcal0.14Vertical0.02ValdiviaTransvcal0.47Santiago PeñalolenTransversal0.29Santiago Pte. AltoLongitudinalcal0.21Santiago PeñalolenTransversal0.18Santiago Pte. AltoLongitudinalcal0.21Elongitudinal0.13Longitudinal0.13Transvcal0.21Santiago La FloridaTransversal0.18Santiago CentroTransvcal0.24Longitudinal0.13Longitudinal0.18Santiago 	Vertical	0.07				
	Longitudinal	0.26		Longitudinal	0.01		Longitudinal	0.05
Valparaiso Almendral	Transversal	0.22	Vallenar	Transversal	0.02	Valdivia	Transversal	0.13
1	Vertical	0.14		Vertical	0.02		Vertical	0.09
	Longitudinal	0.41		Longitudinal	0.27		Longitudinal	0.13
Talca	Transversal	0.47	Santiago Peñalolen	Transversal	0.29	Santiago Pte. Alto	Transversal	0.26
	Vertical	0.21	i enaloien	Vertical	0.29		Vertical	0.26
	Longitudinal	0.24	Santiago La Elorida	Longitudinal	0.13	Santiago Centro	Longitudinal	0.3
Santiago Maipu	Transversal	0.48		Transversal	0.18		Transversal	0.21
marpa	Vertical	0.56	La i lolla	Vertical	0.1		Vertical	0.17
	Longitudinal	0.41		Longitudinal	0.28		Longitudinal	0.55
Papudo	Transversal	0.29	Matanzas	Transversal	0.34	Llolleo	Transversal	0.32
	Vertical	0.15		Vertical	0.24		Vertical	0.67
	Longitudinal	0.45		Longitudinal	0.41		Longitudinal	0.01
Hualañe	Transversal	0.38	Curicó	Transversal	0.47	Copiapó	Transversal	0.03
	Vertical	0.37		Vertical	0.19		Vertical	0.02
	Longitudinal	0.62		Longitudinal	0.28		Longitudinal	0.93
Constitución	Transversal	0.53	Concepción	Transversal	0.4	Angol	Transversal	0.63
	Vertical	0.35		Vertical	0.36		Vertical	0.28



Con estos registros se generaron los espectros que se presentan en la Figura 6-1

Figura 6-1: Componentes Horizontal, Longitudinal y Vertical de los sismos en cuestión

Los sistemas evaluados fueron el modelo del sistema de referencia y el sistema propuesto (M2a). En cada caso se evaluaron los sistemas mediante análisis tridimensionales (incluyendo las aceleraciones verticales registradas en las estaciones).

A este conjunto de registros (32) se le realizó un escalamiento a 15 intensidades distintas Dicho escalamiento se realizo en base al PGA horizontal vectorial (Ecuacion 6.1). Por otra parte la componente vertical u_{gz} se escala al mismo factor.

$$PGA_{vec} = \max\left(\sqrt{\ddot{u}_{gx}^2 + \ddot{u}_{gy}^2}\right) \tag{6.1}$$

En la ecuación anterior \ddot{u}_{gx} y \ddot{u}_{gy} son las aceleraciones horizontales en los ejes X y Y respectivamente.

Luego de definir los registros que se usaran para el análisis, resulta de suprema importancia la definición del criterio de falla del sistema. Dado que los resortes del sistema propuesto esta pensados para permanecer en el rango elástico ante los desplazamientos máximos de los aisladores, se tomara como criterio de falla el daño presentado en el equipo que se desea aislar. Ante esto, y teniendo en cuenta que el daño en cada equipo dependerá de las características del mismo, y que este análisis tendrá una finalidad únicamente comparativa con el sistema de referencia (para el caso de los sismos presentes en Chile), se ha definido como daño una aceleración máxima arbitraria (en el centro de masa del equipo). La razón por la cual se tomó una aceleración y no un desplazamiento yace en que los desplazamientos en los equipos son subsanables con conexiones flexibles, sin embargo, las aceleraciones excesivas generan daños en los sistemas eléctricos de los mismos.

La aceleración horizontal máxima definida como criterio de falla es de 1.5 g en el centro de masa del equipo.

En la Figura 6-2 se presentan las curvas de fragilidad con las características antes descritas, en esta se puede apreciar que (por ejemplo) para un PGA de 0.4 g, el sistema propuesto tiene una probabilidad de falla del 38% mientras que el sistema de referencia tiene una probabilidad de falla de alrededor del 90%.



Figura 6-2: Curvas de fragilidad para una aceleración de 1.5 g

Es importante aclarar, que el sistema de referencia tiene la finalidad de reducir el daño de todo el sistema permitiendo la continuidad operacional del equipo, al margen del nivel de aceleraciones presentadas. Dichos sistemas tienen la finalidad de limitar el desplazamiento con un sistema de topes que disipan energía por impacto. Por otra parte, en el sistema propuesto, se busca principalmente reducir las aceleraciones en el equipo (a aislar) a través de "grandes" desplazamientos (verticales) de los aisladores. Es esta la razón por la cual el sistema propuesto entrega menores aceleraciones en las respuestas y en consecuencia menores probabilidades de falla.

7 CONCLUSIONES

En esta investigación se logró desarrollar un sistema que es capaz de realizar un aislamiento de doble vía, es decir, que aísla al entorno de las vibraciones generadas por el equipo que se desea proteger y que además de esto protege dicho equipo ante eventos sísmicos.

La gran mayoría de los sistemas de aislamiento usados en la actualidad están compuestos por más de un dispositivo y el sistema que se propuso en este documento no es la excepción. En este sistema es preciso ocupar tres o más dispositivos ISO3DG orientados de forma determinada ya que la orientación de los dispositivos resulta fundamental al momento de generar el sistema de aislamiento que se requiere. Por ejemplo, si se usaren cuatro dispositivos y tuviésemos un eje horizontal arbitrario J, dos de ellos debiesen orientar su eje local débil hacia este eje arbitrario mientras que los otros dos debiesen orientar su eje local fuerte hacia este eje arbitrario.

Cabe aclarar que los aisladores del sistema propuesto no necesitan ser calibrados luego de la aplicación de las cargas por peso propio. Esta es una diferencia en comparación a los dispositivos de aislamiento tradicional, en los cuales se debe limitar el desplazamiento del equipo luego de la instalación del mismo sobre el sistema.

A demás de esto, se realizó un análisis de dos sistemas de aislamiento compuesto por dispositivos ISO3DG (Modelos M2a y M2b), la única diferencia entre estos yacía en el número de resortes verticales. El modelo M2a tenía un solo resorte vertical (sistema flexible) y el modelo M2b contaba con dos resortes verticales (sistema rígido). Al someter a ambos sistemas a una excitación basal de gran intensidad a un sismo de gran intensidad, se encontró que el sistema rígido presentó levantamientos en los dispositivos producto de las aceleraciones verticales a las que fue sometido. Para el caso del sistema flexible no se produjo dicho fenómeno, de manera que se concluyó que resulta más efectivo ocupar un resorte vertical en lugar de dos. Esta conclusión representa a demás una ventaja práctica en el dispositivo ya que facilita la instalación del disipador de energía.

En lo referente a la comparación con uno de los sistemas con más presencia en el mercado, se encontró que el sistema propuesto tuvo respuestas de desplazamiento y aceleración menores en el centro de masa del equipo ante cargas sísmicas bajas (ensayo del 10% del sismo en la base). Para el caso de cargas sísmicas altas (ensayo del 100% del sismo en el techo), el sistema propuesto tuvo respuestas de aceleración inferiores al sistema de referencia, pero contó con respuestas de desplazamiento superiores al mismo. Es decir, el sistema propuesto es capaz de proteger el equipo a través de una reducción en las respuestas de aceleración en sacrificio de los desplazamientos. Esta conclusión fue validada en el análisis de fragilidad realizado, el cual tomó como criterio de falla una aceleración de 1.5g en el centro de masa del equipo.

BIBLIOGRAFIA

Almazán JL, Cerda FA, De la Llera JC, López-Garcia D. Linear isolation of stainless steel legged thin-walled tanks. Engineering structures 2007; 29 (7): 1596-1611.

Boroschek, R., Soto, P., Leon, R. (2005). Terremoto Tarapacá 13 de junio de 2005. *Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemánicas, Universidad de Chile, Informe RENADIC.*

Boroschek, R., Soto, P., Leon, R. (2007). Terremoto del norte de chile 14 de noviembre de 2007 m=7.7 informe preliminar n°4. *Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemámicas, Universidad de Chile, Informe RENADIC*.

Boroschek, R., Soto, P., Leon, R. (2010). Registros del Terremoto del Maule mw=8.8 27 de febrero de 2010. *Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemánicas, Universidad de Chile, Informe RENADIC,* 10(05),100

Chopra, A. K. (1995). Dynamics of structures (Vol. 3, p. 339). New Jersey: Prentice Hall.

Clough, R. W., & Penzien, J. (1993). Dynamics of structures. 1993. *Copyright of Applied Mechanics & Materials*.

Díaz Labbé, F. (2009). Consolidado sismo destructivo del 3 de marzo de 1985

Fathali S. and Filiatrault A. Experimental seismic performance evaluation of isolation/restraint systems for mechanical equipment. *Part 1: Heavy equipment study. Technical Report MCEER-07-0007 (2007).*

Gnter K. Hffmann (1985). Full base isolation for earthquake protection by helical springs and viscodampers. Nuclear Engineering and Design. 84(3), 331-338

Li, X., Xue, S. (2011). Experiment of 3-dimensional seismic isolation bearing com- bined with frictional sliding system and disc springs. World Information on Earthquake Engineering, 3(27), 1-7

Li, X.-Y., Xue, S.-D. (2011). Model and design method of a sliding bearing com- bimed with springs for horizontal seismic isolation. Journal of Beijing University of Technology, 11(37), 1650-1654.

Li, X., Xue, S., Cai, Y.(2013) Three-dimensional seismic isolation bearing and its application in long span hangars. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1 (12), 55-65.

Stuardi, J. E., Massa, J. C., & Ruiz, M. E. (2007). Eficiencia de sistemas de aislamiento sísmico basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil,* 7(2), 177-196.

Suhara, J. Tamura, T. Okada, Y. Umeki, K. (2002) Development of Three Dimensional Seismic Isolation Device With Laminated Rubber Bearing and Rolling Seal Type Air Spring. Memorias del 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2 (445), 43-48.

Tajirian, F.F., Kelly, J.M., Aiken, I.D., Veljovich, W. (1990) Elastomeric bearings for three-dimensional seismic isolation. Memorias del 1990 Pressure Vessels and Piping Conference, (200), 7-13

Tornello, M., & Sarrazin, M. A. (2003). Desarrollo e Implementación de un Sistema de Aislación Sísmica de Base para un Edificio Civil. *XI Seminario Iberoamericano de Ingeniería Sísmica y 6º EIPAC*.

Tornello, M. E., & Frau, C. D. (2010). Experiencias sobre aislamiento sismico argentina diseno, modelacion, y construccion en mendoza. *Revista internacional de Ingeniería de Estructuras*, *15*, 1.

Zhao, Y. M., Su, J. Y., and Lu, M. (2011). Experimental Study on Three- Dimensional Base-Isolated Model with 3DIB. Advanced Materials Research, 255, 2325-2329.

ANEXOS

ANEXO A, RESORTES

Dada la importancia de los resortes en este dispositivo, resulta importante analizar las características de los mismos y los esfuerzos presentes durante las etapas límite y de servicio. Para esto, se realizó un análisis teórico de los resortes que serán empleados en el dispositivo y posteriormente se procedió con una verificación en el laboratorio que consistió en la realización de una serie de ensayos que permitieron corroborar la información teórica.

Resortes a Compresión

En este caso, los resortes a compresión usados están ubicados en la parte central de cada uno de los aisladores, orientados de forma vertical en el mismo. La relación constitutiva de este tipo de resortes en función de la fuerza aplicada viene dada por la siguiente expresión.

$$y = \frac{8FD^3N_a}{d^4G}$$

Donde D es el diámetro medio del resorte, Na es el numero de espiras activas, d es el diámetro de la espira y G es el modulo de corte del material. Teniendo esto en cuenta, y para el caso nuestro donde contamos con un resorte vertical con d=11 mm, D=7.7cm, Na=5 y G=815700 kgf/cm tendría la siguiente relación constitutiva.



Figura A-1: Relación teórica

Esfuerzo en espiras

Resulta importante a demás conocer el esfuerzo cortante en la espira del resorte, el cual está dado por la expresión:

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3}$$

Donde

$$K_s = 1 + \frac{0.5}{C}$$
$$C = \frac{D}{d}$$

Por otra parte, la resistencia máxima capaz de soportar el material está dada por la expresión:

$$S_{ys} = 0.60S_{ut}$$
$$S_{ut} = Ad^b$$

Donde para ASTM A227 (estirado en frio) b=-0.1822 y A=1753.3 Mpa. Para el ASTM A228 o alambre de piano, b=-0.1625 y A=2153.5 sabiendo esto, se puede graficar los esfuerzos en las espiras en función de las cargas aplicadas teniendo en cuenta los valores límites para cada material.



Figura A-2: Esfuerzo vs Fuerza

Como se puede apreciar, se espera que en nuestro caso el resorte a compresión empiece a fluir al rededor de los 500 kgf, lo cual corresponde a una deflexión vertical de 7.8cm. Teniendo en cuenta que en nuestro caso se cuenta con un resorte de 16.9cm de altura, se podría apreciar entonces que este resorte tendría una deflexión relativa de hasta el 53.

Frecuencia Natural

Un resorte en si mismo es un sistema masa-resorte y merece ser visto como tal en aplicaciones como esta, muy a pesar que en la mayoría de los casos es despreciada la masa del mismo y por consiguiente sus efectos dinámicos. Dada la aplicación de este resorte resulta importante conocer la frecuencia fundamental del mismo, de manera que ante la aplicación de cargas dinámicas, este no sufra ningún fenómeno asociado a las propiedades dinámicas del cuerpo. La frecuencia natural del primer modo de vibración fn está dada por la expresión

$$fn = \frac{2d}{\pi N_a D^2} \sqrt{\frac{Gg}{32\gamma}} Hz$$

Donde γ es la densidad del material y g es la aceleración gravitacional. Para el caso del segundo modo, simplemente basta con multiplicar por dos la expresión del primer modo de vibración. Sabiendo esto la frecuencia natural del primer y segundo modo seria:

$$fn1 = \frac{2*1.1}{\pi*5*7.7^2} \sqrt{\frac{(801.7x10^3)980}{32*7.8}} = 4.19Hz$$
$$fn2 = 2\frac{2*1.1}{\pi*5*7.7^2} \sqrt{\frac{(801.7x10^3)980}{32*7.8}} = 8.38Hz$$

Resortes a Tracción

En este caso, los resortes a tracción usados están ubicados en los costados de cada uno de los aisladores, orientados de forma horizontal en el mismo.

La relación constitutiva de este tipo de resortes en función de la fuerza aplicada viene dada por la siguiente expresión.

$$y = \frac{8(F - Fo)D^3N_a}{d^4G}$$

Donde

$$Fo = \frac{\tau * \pi * d^2}{8C}$$

Y τ estaría entre 900 kgf/cm² y 1500 kgf/cm². Se puede apreciar que es la misma que la usada en resortes a compresión, solo que para este caso se tienen en cuenta todas las espiras o mejor aún, todas las espiras son activas y se tiene en cuenta una fuerza inicial.

Teniendo esto en cuenta, y para el caso nuestro donde contamos con dos resortes horizontales, cada uno con d=6 mm, D=5.6cm, Na=9.9 (luego de ver el resorte fabricado) y $G=815700 \text{ kgf/cm}^2$ tendría la siguiente relación constitutiva.



Figura A-3: Relación Teórica

Esfuerzo en espiras

Resulta importante a demás conocer el esfuerzo cortante en la espira del resorte, el cual está dado por la expresión:

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3}$$

Donde

$$K_s = 1 + \frac{0.5}{C}$$
$$C = \frac{D}{d}$$

Por otra parte, la resistencia máxima capaz de soportar el material está dada por la expresión:

$$S_{ys} = 0.60S_{ut}$$
$$S_{ut} = Ad^b$$

Donde para ASTM A227 (estirado en frio) b=-0.1822 y A=1753.3 Mpa. Para el ASTM A228 o alambre de piano, b=-0.1625 y A=2153.5 sabiendo esto, se puede graficar los esfuerzos en las espiras en función de las cargas aplicadas teniendo en cuenta los valores límites para cada material.



Figura A-4: Esfuerzo vs Fuerza

En los resortes a tracción reviste particular importancia analizar el comportamiento en los terminales del resorte. En este caso se analizará el terminal mas común que consiste en un medio lazo tal y como se presenta en la figura a continuación.



Figura A-5: Puntos críticos del terminal

Para este tipo de terminal se ha encontrado que los puntos mas críticos son los puntos 1 y 2 presentes en la figura anterior, para los cuales

$$\sigma_1 = K_b \frac{16DF}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2}$$
$$\tau_2 = K_{W2} \frac{8DF}{\pi d^3}$$

Donde

$$K_{b} = \frac{4C_{1}^{2} - C_{1} - 1}{4C_{1}(C_{1} - 1)}$$
$$C_{1} = \frac{2R_{1}}{d}$$
$$K_{W2} = \frac{4C_{2} - 1}{4C_{2} - 4}$$
$$C_{2} = \frac{2R_{2}}{d}$$

En este caso y para el resorte en cuestión, con R1=2.8cm y R2=0.1cm tendremos que los esfuerzos en los puntos 1 y 2 estarán dados en función de:

$$C_1 = \frac{2 * 2.8}{0.6} = 9.33$$
$$K_b = \frac{4(*9.33^2) - 9.33 - 1}{4 * 9.33 * (9.33 - 1)} = 1.086$$
$$C_2 = \frac{2 * 0.1}{0.6} = 0.3333$$
$$K_{W2} = \frac{(4 * 0.333) - 1}{(4 * 0.333) - 4} = -0.125$$

- -

Con esta información se puede trazar la siguiente grafica.



Figura A-6: Esfuerzos Críticos

Como se puede apreciar, se espera que en nuestro caso el resorte a compresión empiece a fluir al rededor de los 500 kgf, lo cual corresponde a una deflexión vertical de 7.8cm. Teniendo en cuenta que en nuestro caso se cuenta con un resorte de 16.9cm de altura, se podría apreciar entonces que este resorte tendría una deflexión relativa de hasta el 53

Frecuencia fundamental

Tal y como se presento en los resortes verticales, la frecuencia natural del primer modo de vibración fn está dada por la expresión

$$fn = \frac{2d}{\pi N_a D^2} \sqrt{\frac{Gg}{32\gamma}} Hz$$

Donde γ es la densidad del material y g es la aceleración gravitacional. Para el caso del segundo modo, simplemente basta con multiplicar por dos la expresión del primer modo de vibración. Sabiendo esto la frecuencia natural del primer y segundo modo sería:

$$fn1 = \frac{2*0.6}{\pi*9*5.6^2} \sqrt{\frac{(801.7x10^3)980}{32*7.8}} = 2.40Hz$$
$$fn2 = 2\frac{2*0.6}{\pi*9*5.6^2} \sqrt{\frac{(801.7x10^3)980}{32*7.8}} = 4.80Hz$$

ANEXO B, ENSAYOS CARACTERÍSTICOS

Resortes

La configuración de resorte a tracción (del aislador) fue ensayado en el laboratorio entre otras cosas, para constatar las propiedades físicas del mismo. Para este ensayo se realizó un montaje compuesto por un sistema de vigas a reacción y un gato perforado tal y como se muestra en la imagen a continuación



Figura B-1: Montaje resorte a tracción

Con este montaje se realizaron dos ciclos de carga en los cuales se controlo el desplazamiento. La curva Fuerza deformación del ensayo resulto de la siguiente forma



Figura B-2: Fuerza-Deformación

Cuando el resorte alcanzó una deformación de alrededor de 80 mm, se capturó la imagen a continuación



Figura B-3: Resorte con 80 mm de deformación

Si comparamos la curva teórica en combinación de la curva determinada en el laboratorio, resultarían las siguientes curvas



Figura B-4: Comparativa relación teórica-practica

Con la idea de ajustar las relaciones constitutivas, basta con modificar la tensión de corte inicial (de 900 kgf/cm² a 400 kgf/cm²) y el modulo G (de 815700 kgf/cm² a 800000 kgf/cm²). Con lo anterior se lograría un ajuste mucho mas acercado a la realidad, tal y como se presenta en las curvas a continuación.



Figura B-5: Comparativa relación teórica-practica

De manera de conocer las tensiones a través de las deformaciones unitarias en el punto uno, el resorte fue instrumentado con unos strain gages en la parte interior y exterior de este punto. Con la información obtenida en el laboratorio se podrían calcular las tensiones en función de los desplazamientos del resorte, resultando la siguiente curva.



Figura B-6: Tensión-desplazamiento punto 1 exterior

Aislador ISO3DG

Se realizó un programa de ensayos en el cual se evaluó el comportamiento del aislador con diferentes configuraciones tal y como se muestra en la Figura B-7.

Dichos ensayos consistieron en la aplicación de una carga cíclica en la dirección principal del movimiento de los aisladores. Dicha carga se realizó mediante una serie de ciclos (dos o más en cada uno de los casos) con la finalidad de obtener información acerca de la disipación de energía y demás propiedades del mismo sistema.

Los ensayos fueron realizados con una prensa hidráulica en el laboratorio de estructuras de la pontificia universidad católica de chile. Dicha prensa tiene una capacidad total de 5 tonf.



Figura B-7: Configuraciones ensayadas, A. Sistema flexible (M2a) y B. Sistema rígido (M2b)

Para la medición de las deformaciones se ocuparon dos deformímetros principales que median el desplazamiento de la placa superior (en relación a una posición inicial) y dos deformímetros secundarios ubicados a los costados permitiendo así determinar cualquier comportamiento o giro anómalo durante los ensayos.

Se puede ver en la Figura B-7 que la primera configuración (a) consiste en el aislador con un solo resorte a compresión trabajando en la dirección del movimiento principal del aislador y dos resortes a tracción ubicado de manera horizontal en el sistema. Dichos resortes horizontales aportan una alta rigidez inicial y convierten al dispositivo en un sistema de rigidez variable que depende del desplazamiento (en la dirección principal)del mismo. Para el caso de la configuración B, se cuenta a demás (en comparación con la A) con un resorte interior a compresión. Esta solución se estudiaría para los casos de cargas mayores sobre el dispositivo a lo largo de su etapa de servicio.

Configuracion A

Para la configuración A se ocupo una carcasa como se muestra en la figura a continuación


Figura B-8: Configuración Aislador flexible (M2a)

Luego de realizado el montaje y dado inicio a la aplicación de las cargas, fue apreciable la inestabilidad con la que cuenta el dispositivo al trabajar de manera independiente (y no en conjunto). Esto ya que como se muestra en la Figura B-9 el dispositivo en las direcciones Kt3 y K2 es particularmente inestable trabajando solo y ante la ´única aplicación de una carga en la dirección principal del movimiento K1.



Figura B-9: Diferencias de Rigidez

A manera de superar este inconveniente, se realizó el ensayo a dos dispositivos simultáneamente ubicados de manera perpendicular de manera que la inestabilidad en la dirección Kt3 del primero sea estabilizada por la dirección Kt2 del segundo, y la inestabilidad en la dirección K2 del segundo sea estabilizada por la dirección K3 del primero. Es preciso tener en cuenta que para este montaje fue necesario a demas asegurar la distribución homogénea de las cargas sobre los dos dispositivos mediante diferentes

instrumentos de medición de manera de no viciar los resultados al momento de compararlos con las estimaciones numéricas calculadas para un solo aislador en la dirección principal del movimiento.

Para este ensayo se realizaron cuatro incrementos de carga en los que se controló el desplazamiento, es decir, primero se cargó el dispositivo a un desplazamiento vertical de 10 mm y se descargó de manera controlada a 0.5 mm, luego se cargó hasta alcanzar los 20 mm y nuevamente se descargó a 0.5 mm, de esta misma manera se realizaron dos cargas y descargas mas (a 40 mm y a 70 mm). Los resultados obtenidos fueron escalados a un solo aislador y se presentan en la figura a continuación



Figura B-10: Ensayo Configuración A

Como se puede apreciar, los dos primeros incrementos de carga (10 mm y 20 mm) corresponden a un comportamiento típico hiperelastico, con ligeros bucles de disipación de energía producto del roce entre los componentes del aislador. Por otro lado, para los otros dos incrementos de carga, se observó un comportamiento similar en el cual la disipación de energía cobro una mayor importancia, este fenómeno en particular se debió a que el contacto entre las terminales de los resortes a tracción y las barras lisas de la carcasa no fue aislado de fricción, causando una región de altas tensiones en el contacto evitando el libre acomodamiento de los resortes a tracción y de manera subsiguiente fluencia en dicha región de altas tensiones. Con el fin de evitar esta concentración de tensiones se

recomienda cambiar el tipo de unión de manera que los resortes horizontales se puedan acomodar de manera libre. Los modelos numéricos realizados en este estudio suponen que en esta conexión no se desarrollan este tipo de tensiones.

Estos resultados fueron comparados con las estimaciones numéricas como se muestra en la imagen a continuación



Figura B-11: Ensayo Configuración A

Como se puede observar, hay una convergencia aceptable entre las estimaciones numéricas y las pruebas de laboratorio.

Configuración B

Para la configuración B, tal y como se mencionó anteriormente, consta con dos resortes a compresión y dos a tracción. A demás de esto se ocupó el mismo montaje (con dos aisladores ubicados de manera perpendicular) con la misma cantidad y ubicación de los transductores y celdas de carga. Dada la experiencia del ensayo A, en este caso las áreas de contacto entre los resortes y las barras lisas fueron lubricadas con aceite con el objetivo de disminuir la fricción en estas áreas de contacto y mejorar el comportamiento conjunto del dispositivo.

En este ensayo se realizaron siete incrementos de carga y descarga, en los dos primeros se cargo hasta una deflexión de 5 mm cada uno y del tercero en adelante se realizaron incrementos de 10 mm tal y como se presenta en la figura a continuación.



Figura B-12: Ensayo Configuración B

Como se puede apreciar hubo una reducción notable de la energía disipada producto del fenómeno de deformaciones plásticas localizadas visto en el ensayo anterior. Claramente tuvo un efecto positivo la aplicación de aceite en la región de contacto entre los resortes y la barra lisa con el fin de reducir la fricción.

A demás de esto fue clara la participación del resorte interior aumentando la pendiente de la región de la curva de rigidez secundaria.

La comparación grafica de los resultados numéricos con lo medido en el laboratorio se presenta en la siguiente figura.



Figura B-13: Comparativo Teórico-Practico

Como se puede apreciar en la figura anterior, la convergencia entre las dos curvas es alta. No obstante, en la primera parte de las curvas (cercano a la región donde se presenta el cambio de rigidez, se logran apreciar ligeras discrepancias entre ambas curvas. Se presume que estas discrepancias son producto precisamente del contacto entre las barras lisas y las terminales de los resortes a tracción, aparentemente al tener una superficie de contacto con poca fricción, hubo un tramo en el cual dichos resortes a tracción pasaron por un proceso de acomodamiento y no aportaron a la rigidez del sistema restándole rigidez inicial al dispositivo. Posterior a esto se aprecia que ambas curvas tienen mayor convergencia dando lugar a un sistema más ajustado a las estimaciones numéricas.