



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**REDUCCIÓN EN LA RESPUESTA  
SÍSMICA TORSIONAL DEL EDIFICIO  
SANTIAGO NORTE A TRAVÉS DEL  
USO DE UN AMORTIGUADOR DE  
MASA SINTONIZADA.**

**GONZALO ANÍBAL DOTE CASTRO**

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de  
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

**JOSÉ LUIS ALMAZÁN CAMPILAY**

Santiago de Chile, enero, 2017.

(A mi esposa e hijo, padres y  
hermanos, por quienes trato de ser una  
mejor persona...)

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a mi esposa y a mi hijo, quienes pacientemente aceptaron resignar gran parte de nuestro tiempo de familia por mis tardes de estudio.

Asimismo, agradezco a mis empleadores durante la época que asistí a clases en el Magíster, quienes siempre tuvieron la buena disposición para facilitarme la posibilidad de efectuar dicha actividad.

Agradezco a los profesores del Magíster, especialmente al profesor José Luis Almazán, por su ayuda, su guía y paciencia para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, agradezco a mis compañeros en el Magíster: Ximena Puentes, Miguel Medalla, Carlos Peña y Darío Lobos, por su amistad y ayuda durante el desarrollo del Magíster.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. Objetivos .....	2
I.2. Alcances .....	2
II. MARCO TEÓRICO. ....	3
II.1. Obtención de las ecuaciones que rigen la respuesta de estructuras en las que se ha implementado un AMS.....	3
II.2. Obtención de los parámetros de diseño de un AMS. ....	6
III. ANTECEDENTES .....	10
III.1. Caracterización del edificio.....	10
III.1.1. General.....	10
III.1.2. Materiales. ....	15
III.1.3. Cargas. ....	16
III.2. Modelación edificio.....	26
III.3. Modelación AMS. ....	27
IV. METODOLOGÍA.....	28
IV.1. Definición de los tipos de modelos. ....	28
IV.2. Definición del criterio de evaluación de eficiencia del AMS. ....	28
IV.3. Definición de los modelos.....	32

V.	RESULTADOS .....	34
V.1.	Edificio original (sin AMS).....	34
V.2.	Edificio con AMS compuesto sólo por aisladores elastoméricos. ....	35
V.2.1.	Determinación de la masa del AMS. ....	35
V.2.2.	Determinación de la rigidez y amortiguamiento del AMS. ....	41
V.2.3.	Determinación de la ubicación en planta del AMS. ....	47
V.2.4.	Determinación de las propiedades del AMS, modelo final. ....	50
V.2.5.	Determinación de la respuesta de la estructura y del AMS, considerando aisladores elastoméricos. ....	58
V.3.	Edificio con AMS compuesto por aisladores elastoméricos y deslizadores.63	
V.3.1.	Determinación de las propiedades del AMS, modelo final. ....	63
V.3.2.	Determinación de la respuesta de la estructura y del AMS, considerando aisladores de goma y deslizadores friccionales. ....	66
V.4.	Desplazamientos totales máximos por piso y desviación estándar máxima de los desplazamientos por piso para el edificio con ambos tipos de AMS. ....	71
VI.	CONCLUSIONES.....	77
	BIBLIOGRAFIA.....	78
	A N E X O S.....	79
	Anexo A: DISEÑO AISLADOR a-5 SEGÚN DISPOSICIONES DE LA NCh2745.OF2003 .....	79
	Anexo B: DISEÑO AISLADOR a-3 SEGÚN DISPOSICIONES DE LA NCh2745.OF2003 .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla V-1: Resultados análisis modal: períodos, factores de masa participativa modal en dirección X, Y y en torno al eje Z. ....	34
Tabla V-2: Máximo desplazamiento total de la estructura en planta de elevación 48.05m	35
Tabla V-3: propiedades de AMS para definir la masa. ....	36
Tabla V-4: Máximos desplazamientos totales en planta de azotea para caso de carga Lolloe 2010-1 .....	39
Tabla V-5: Máximos desplazamientos totales en planta de azotea para caso de carga Lolloe 2010-2 .....	39
Tabla V-6: reducción en los desplazamientos totales para cada AMS, para Lolloe 2010-1. ....	40
Tabla V-7: reducción en los desplazamientos totales para cada AMS, para Lolloe 2010-2. ....	40
Tabla V-8: propiedades de aisladores elastoméricos. ....	41
Tabla V-9: Máximos desplazamientos totales en planta de azotea para caso de carga Lolloe 2010-1 .....	45
Tabla V-10: Máximos desplazamientos totales en planta de azotea para caso de carga Lolloe 2010-2 .....	45
Tabla V-11: reducción en los desplazamientos totales para cada AMS, para Lolloe 2010-1. ....	46
Tabla V-12: reducción en los desplazamientos totales para cada AMS, para Lolloe 2010-2. ....	46
Tabla V-13: propiedades de aisladores elastoméricos. ....	47
Tabla V-14: Máximos desplazamientos totales para edificio original y con AMS, según posición en planta del AMS. ....	47
Tabla V-15: reducción en los máximos desplazamientos totales para según posición en planta del AMS. ....	48
Tabla V-16: Máximos desplazamientos totales para edificio original y con AMS, según posición en planta del AMS. ....	48
Tabla V-17: reducción en los máximos desplazamientos totales para según posición en planta del AMS. ....	49
Tabla V-18: datos iniciales para determinación de propiedades del AMS. ....	52
Tabla V-19: dimensiones del cajón. ....	53
Tabla V-20: esferas de acero. ....	53
Tabla V-21: dimensiones del AMS. ....	54
Tabla V-22: propiedades horizontales de aisladores elastoméricos del AMS. ....	55
Tabla V-23: Máximos desplazamientos totales para edificio con AMS. ....	58
Tabla V-24: reducción de los máximos desplazamientos totales de edificio. ....	58
Tabla V-25: desplazamiento total de diseño AMS. ....	59
Tabla V-26: desplazamiento total máximo AMS. ....	59
Tabla V-27: magnitudes de carga axial por aislador (parte 1) .....	60
Tabla V-28: carga muerta axial sobre aisladores .....	62
Tabla V-29: Máximos desplazamientos totales para edificio con AMS. ....	66
Tabla V-30: reducción en los máximos desplazamientos totales de edificio. ....	66

Tabla V-31: desplazamiento total de diseño AMS.....	67
Tabla V-32: desplazamiento total máximo AMS.....	68
Tabla V-33: magnitudes de carga axial por deslizador (parte 1) .....	69
Tabla V-34: magnitudes de carga axial por deslizador (parte 2) .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1: Parámetros para caracterización de un amortiguador de masa sintonizada (AMS).....	3
Figura II-2: AMS como disipador de energía. ....	6
Figura II-3: AMS como disipador de energía. ....	8
Figura III-1: fachada nororiente edificio Santiago Norte.....	10
Figura III-2: fachada suroriente edificio Santiago Norte. ....	11
Figura III-3: fachada poniente edificio Santiago Norte. ....	11
Figura III-4: isométrica de edificio en estudio.....	12
Figura III-5: planta estructura de cielo subterráneo (izquierda) y cielo primer piso (derecha).....	13
Figura III-6: planta estructura de cielo segundo piso (izquierda) y cielo tercer a duodécimo piso (derecha). ....	14
Figura III-7: planta estructura de cielo décimotercer piso (izquierda) y cielo décimocuarto piso (derecha). ....	14
Figura III-8: Estación Llolleo, registro del sismo del Maule 2010, componente 10° .....	17
Figura III-9: Estación Llolleo, registro del sismo del Maule 2010, componente 100° .....	17
Figura III-10: Estación Llolleo, registro del sismo de Llolleo 1985, componente 10° .....	18
Figura III-11: Estación Llolleo, registro del sismo de Llolleo 1985, componente 100° .....	18
Figura III-12: Estación Viña del Mar, registro del sismo de Llolleo 1985, componente 200° .....	19
Figura III-13: Estación Viña del Mar, registro del sismo de Llolleo 1985, componente 290° .....	19
Figura III-14: Pares ortogonales: Llolleo 2010-1 (izquierda) y Llolleo 2010-2 (izquierda).....	20
Figura III-15: Pares ortogonales: Llolleo 1985-1 (izquierda) y Llolleo 1985-2 (izquierda).....	21
Figura III-16: Pares ortogonales: Viña 1985-1 (izquierda) y Viña 1985-2 (izquierda) .....	21
Figura III-17: Definición de caso de carga Llolleo 2010-1 en SAP2000.....	22
Figura III-18: Definición de caso de carga Llolleo 2010-2 en SAP2000.....	23
Figura III-19: Definición de caso de carga Llolleo 1985-1 en SAP2000.....	23
Figura III-20: Definición de caso de carga Llolleo 1985-2 en SAP2000.....	24
Figura III-21: Definición de caso de carga Viña 1985-1 en SAP2000. ....	24
Figura III-22: Definición de caso de carga Viña 1985-2 en SAP2000. ....	25
Figura III-23: Amortiguamiento tipo Rayleigh aplicado al modelo en SAP2000 (típico)..	27
Figura IV-1: en los círculos rojos se presentan los nodos en la planta de elevación 48.05m, donde se ha medido los desplazamientos totales. ....	29
Figura IV-2: puntos de medición de los desplazamientos totales de piso, planta estructura de cielo primer piso (izquierda) y de cielo segundo piso (derecha).....	30
Figura IV-3: puntos de medición de los desplazamientos totales de piso, planta estructura y cielo tercer a duodécimo piso (izquierda), cielo décimotercer piso (centro) y cielo décimocuarto piso (derecha). ....	31
Figura V-1: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-1. ....	36
Figura V-2: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-2. ....	37



Figura V-3: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-3. ....	37
Figura V-4: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-4. ....	38
Figura V-5: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-5. ....	38
Figura V-6: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-1. ....	42
Figura V-7: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-2. ....	42
Figura V-8: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-3. ....	43
Figura V-9: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-4. ....	43
Figura V-10: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-5. ....	44
Figura V-11: Ubicación en planta AMS. Elevación 48.05m (azotea) .....	50
Figura V-12: refuerzo de losa de azotea en sector donde se ha dispuesto del AMS.....	51
Figura V-13: corte 1-1 .....	52
Figura V-14: planta AMS.....	54
Figura V-15: corte 2-2 AMS .....	55
Figura V-16: disposición de los aisladores en el AMS. A-1 posee una conexión deslizante en la dirección X. ....	56
Figura V-17: definición de los aisladores elastoméricos A-2 a A-4 en el modelo AMS3..	57
Figura V-18: definición del aislador elastomérico A-1 en el modelo AMS3. ....	57
Figura V-19: disposición de los aisladores y deslizadores en el modelo AMS4. A-5 posee una conexión deslizante en la dirección X.....	63
Figura V-20: definición de deslizador friccional D-1 a D5 en el modelo AMS4. ....	65
Figura V-21: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole 2010-1. ....	71
Figura V-22: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole 2010-1 .....	71
Figura V-23: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga. Lollole 2010-2. ....	72
Figura V-24: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4 para el caso de carga. Lollole 2010-2.....	72
Figura V-25: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole1985-1. ....	73
Figura V-26: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole1985-1. ....	73
Figura V-27: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole1985-2. ....	74
Figura V-28: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole1985-2. ....	74

Figura V-29: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Viña1985-1. ....	75
Figura V-30: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Viña1985-1. ....	75
Figura V-31: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Viña1985-2. ....	76
Figura V-32: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Viña1985-2. ....	76

## RESUMEN

Este trabajo estudia el control de la respuesta torsional del edificio Santiago Norte a través de la implementación de un amortiguador de masa sintonizada (AMS) en la planta de la azotea. Para este fin, se modeló el edificio tridimensionalmente obteniéndose su respuesta ante pares de registros sísmicos. Posteriormente se le adicionó el AMS, utilizando dos tipos de modelo: el primero, más sencillo, corresponde a un elemento “link” del tipo lineal, de dos nodos, destinado a establecer las propiedades del AMS (masa, rigidez, amortiguamiento y ubicación en la planta del edificio) que generan una mayor reducción en la respuesta torsional del edificio, que se usarán en el segundo modelo. El segundo, destinado a medir la respuesta del AMS y de la estructura, consiste en una losa vinculada a la losa de azotea por elementos “link” del tipo lineal (representando aisladores elastoméricos) con y sin elementos “link” del tipo aislador friccional (representando deslizadores friccionales).

Para cada tipo de modelo se estableció un criterio para evaluar la eficiencia del AMS en el control de la respuesta torsional: el primero (para el modelo del elemento “link” de dos nodos) consistió en determinar el nivel de reducción, respecto a respuesta de la estructura original (sin AMS) de los desplazamientos totales medidos en los vértices de la losa de azotea (planta de elevación 48.05m) mientras que el segundo (para el modelo de losa vinculada con elementos “link”) consistió en determinar la reducción del desplazamiento total medido en el vértice de mayor desplazamiento, para cada planta, respecto a la respuesta de la estructura original.

De los modelos desarrollados para este trabajo, el obtenido de la sintonía de las frecuencias propias del AMS con las frecuencias fundamentales translacionales de la estructura original fue la que produjo la mayor reducción de la respuesta torsional.

## ABSTRACT

This research studies the control of the torsional response of the Santiago Norte building through the implementation of a tuned mass damper (TMD) in the roof plant. For this purpose, the building was modeled three-dimensionally obtaining its response to pairs of seismic records. Then, the TMD was added, using two types of model: the first, simpler, corresponds to a link element of the linear type, of two nodes, to establish the properties of TMD (mass, stiffness, damping and location in the floor of the building) that generate a greater reduction in the torsional response of the building, which will be used in the second model. The second, to measure the response of the TMD and the structure, consists of a slab linked to the roof slab by linear link elements (representing elastomeric insulators) with and without frictional insulating link elements (representing frictional sliders).

For each type of model, a criterion was established to evaluate the efficiency of the TMD in the control of the torsional response: the first one (for the model of the link element of two nodes) was to determine the level of reduction, with respect to response of the original structure (without TMD) of the total displacements measured at the vertices of the roof slab (elevation plant 48.05 m) while the second (for the slab model linked with link elements) consisted in determining the reduction of total displacement measured at the vertex of greatest displacement, for each plant, with respect to the response of the original structure.

From the models developed for this research, the obtained from the tuning of the TMD own frequencies with the translational fundamental frequencies of the original structure was the one that produced the greatest reduction of the torsional response.

## **I. INTRODUCCIÓN.**

Al igual que cualquier otra disciplina de la ingeniería, el diseño estructural sismorresistente se va actualizando con los años. Cada año se registran en Chile cientos de sismos, no todos perceptibles, de los que va quedando registro y lecciones aprendidas que se ven reflejadas en las actualizaciones de los códigos de diseño.

Por otra parte, las herramientas de análisis se han ido volviendo más poderosas, mejorando en su capacidad de modelar situaciones más complejas que lo que se podía hacer hace algunos años, y que en ese entonces se cubrían con disposiciones y/o hipótesis del diseñador teóricamente conservadoras.

Debido a lo anterior es que estructuras, actualmente en funcionamiento, pueden ir quedando por debajo de los estándares que la actualización de los códigos de diseño sismorresistente establecen como mínimos y/o podrían verse afectadas por problemas detectados por las nuevas herramientas de análisis. Por ese motivo es importante estudiar dispositivos que puedan instalarse sobre estructuras ya construidas para controlar la respuesta estructural a sollicitaciones sísmicas.

El amortiguador de masa sintonizada (AMS) es un dispositivo que disipa energía de la estructura a la que se encuentra acoplada, energía que puede provenir de un sismo, cargas de viento u otras. Corresponde a un control pasivo de vibraciones.

Un AMS podría instalarse, haciendo algunas adecuaciones y/o refuerzos de la estructura principal, en cualquier edificio.

Se ha utilizado como caso de estudio el edificio Santiago Norte debido a que, por la asimetría en sus plantas, posee una respuesta torsional que puede ser controlada, como se demuestra en este estudio, mediante el uso de AMS.

### **I.1. Objetivos**

Evaluar la reducción de la respuesta torsional de un edificio “real” utilizando un amortiguador de masa sintonizada.

### **I.2. Alcances**

El comportamiento del edificio se ha considerado dentro del rango lineal elástico.

El comportamiento de los aisladores y deslizadores de los AMS se ha considerado no lineal.

El edificio es una estructura sobre base fija (no aislada).

Los resultados son válidos exclusivamente para el edificio analizado, por lo que no son necesariamente extrapolables para otros casos.

## II. MARCO TEÓRICO.

A continuación se presenta, para estructuras en las que se ha implementado un AMS, la deducción de las ecuaciones que caracterizan la respuesta dinámica tanto de la estructura como del AMS. Seguido de ello se presenta el estudio de los parámetros de que optimizan el diseño de un AMS.

### II.1. Obtención de las ecuaciones que rigen la respuesta de estructuras en las que se ha implementado un AMS.

El esquema que representa la estructura y el AMS se presenta a continuación:

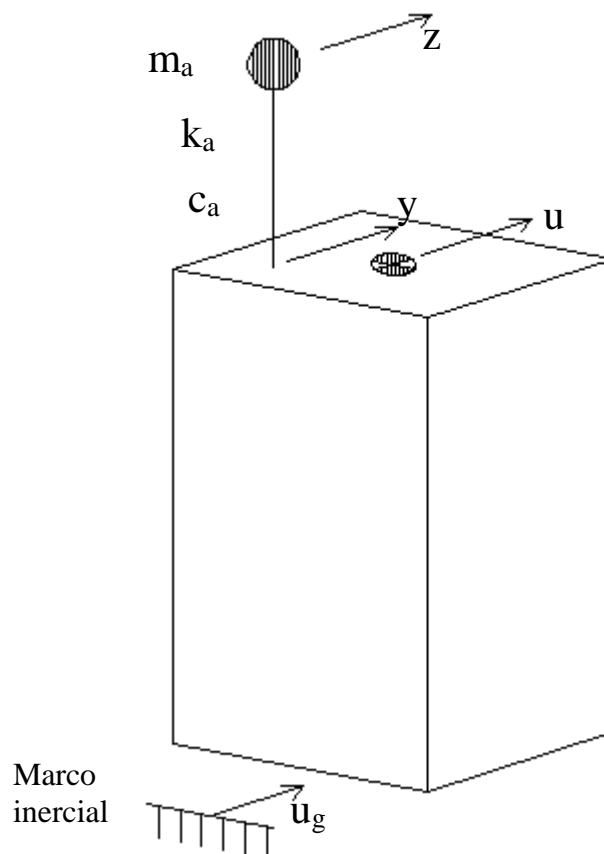


Figura II-1: Parámetros para caracterización de un amortiguador de masa sintonizada (AMS)

Donde:

$U_g$ : desplazamiento del suelo.

$U$ : desplazamiento de los grados de libertad del edificio respecto a la base.

$Y$ : desplazamiento del punto de conexión del AMS respecto a la base

$Z$ : desplazamiento del AMS respecto al punto de anclaje.

Para la estructura principal, se obtiene las siguientes ecuaciones de movimiento:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + L_a^T f_{AMS} = -Mr\ddot{u}_g \quad (2.1)$$

Donde:

$M$ : matriz de masa de la estructura principal.

$C$ : matriz de amortiguamiento de la estructura principal.

$K$ : matriz de rigidez de la estructura principal.

$r$ : vector relaciona cinemáticamente la sollicitación del suelo (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) con los grados de libertad de la superestructura.

$L_a$ : matriz que relaciona cinemáticamente los grados de libertad de la estructura con los del AMS.

Para el AMS:

$$m_a \ddot{z}^t = -c_a \dot{z} - k_a z = f_{AMS}(t) \quad (2.2)$$

Reordenando:

$$m_a \ddot{z}^t + c_a \dot{z} + k_a z = 0 \quad (2.3)$$

A partir de la relación cinemática:

$$z^t = L_a(r u_g + u) + z \quad (2.4)$$



Derivando la expresión anterior respecto al tiempo y reemplazando la expresión (2.2) se tiene las siguientes expresiones:

$$m_a \ddot{z} + c_a \dot{z} + k_a z = -m_a L_a r \ddot{u}_g - m_a L_a \ddot{u} \quad (2.5)$$

$$f_{AMS}(t) = -c_a \dot{z} - k_a z = m_a \ddot{z}^t \quad (2.6)$$

Combinando las ecuaciones (2.1) y (2.5) se obtiene la expresión que rige la respuesta dinámica de la estructura y el AMS:

$$\begin{bmatrix} M + L_a^T m_a L_a & L_a^T m_a \\ m_a L_a & m_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & c_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & k_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M + L_a^T m_a L_a \\ m_a L_a \end{bmatrix} r \ddot{u}_g \quad (2.7)$$

## II.2. Obtención de los parámetros de diseño de un AMS.

Al analizar un AMS lineal como disipador de energía:

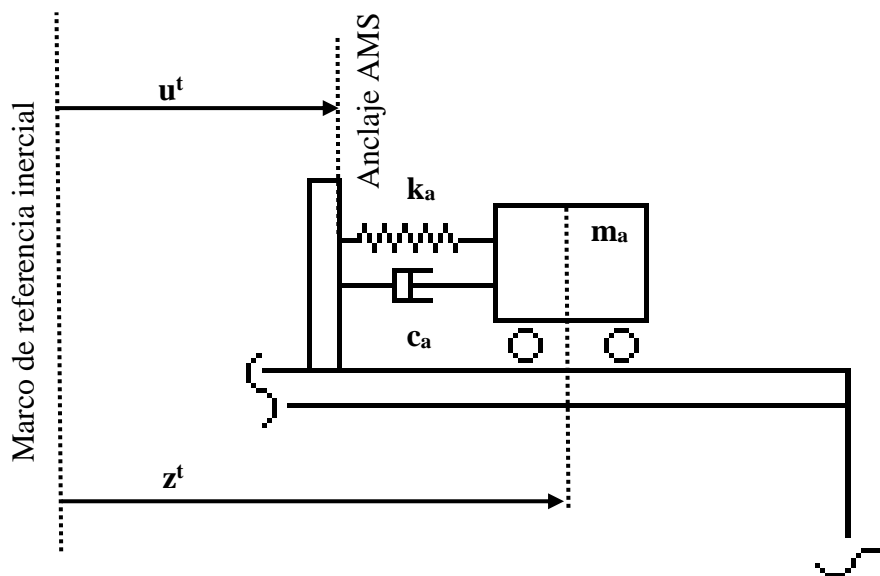


Figura II-2: AMS como disipador de energía.

Según la figura anterior, se plantean las siguientes ecuaciones para el equilibrio dinámico:

$$m_a \ddot{z}^t = -k_a(z^t - u^t) - c_a(\dot{z}^t - \dot{u}^t) \quad (2.8)$$

Al cambiar el dominio de la respuesta en el tiempo a las frecuencias, utilizando la transformada de Fourier, se obtiene:

$$-m_a \omega^2 Z(j\omega) = -k_a(Z(j\omega) - U(j\omega)) - c_a j\omega(Z(j\omega) - U(j\omega)) \quad (2.9)$$

Reordenando:

$$\frac{Z(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{k_a + c_a j\omega}{-\omega^2 m_a + j\omega c_a + k_a} \quad (2.10)$$

Siendo la función de transferencia resultante la entregada en la siguiente expresión:

$$H(j\omega) = \frac{k_a + c_a j\omega}{-\omega^2 m_a + j\omega c_a + k_a} \quad (2.11)$$

Las fuerzas inerciales, provenientes del AMS, se expresan según la siguiente expresión:

$$f_{AMS}(t) = m_a \ddot{z}^t \quad (2.12)$$

Expresando la ecuación anterior en el dominio de la frecuencia, las fuerzas inerciales del AMS se determinan según las siguientes expresiones:

$$F_{AMS}(j\omega) = -m_a \omega^2 Z(j\omega) \quad (2.13)$$

$$\frac{F_{AMS}(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{-m_a \omega^2 (k_a + c_a j\omega)}{-\omega^2 m_a + j\omega c_a + k_a} \quad (2.14)$$

$$\frac{F_{AMS}(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{-\hat{\omega}^2 (1 - \hat{\omega}^2 + 4\xi_a^2 \hat{\omega}^2)}{(1 - \hat{\omega}^2)^2 + 4\xi_a^2 \hat{\omega}^2} k_a + \frac{\omega_a \hat{\omega}^5}{(1 - \hat{\omega}^2)^2 + 4\xi_a^2 \hat{\omega}^2} c_a \quad (2.15)$$

Dónde:

$$\omega_a = k_a / m_a \quad (2.16)$$

$$\hat{\omega} = \omega / \omega_a \quad (2.17)$$

$$c_a / m_a = 2\xi_a \omega_a \quad (2.18)$$

De la ecuación (2.15) se obtienen las expresiones de las componentes de los módulos de almacenamiento (S(j $\omega$ )) y de pérdida (L(j $\omega$ )) característicos de disipadores de energía:

$$S(j\omega) = \frac{-\hat{\omega}^2(1-\hat{\omega}^2+4\xi_a^2\hat{\omega}^2)}{(1-\hat{\omega}^2)^2+4\xi_a^2\hat{\omega}^2} k_a \quad (2.19)$$

$$L(j\omega) = \frac{\omega_a \hat{\omega}^5}{(1-\hat{\omega}^2)^2+4\xi_a^2\hat{\omega}^2} c_a \quad (2.20)$$

Graficando las expresiones anteriores en función de  $\hat{\omega}$ , se tiene:

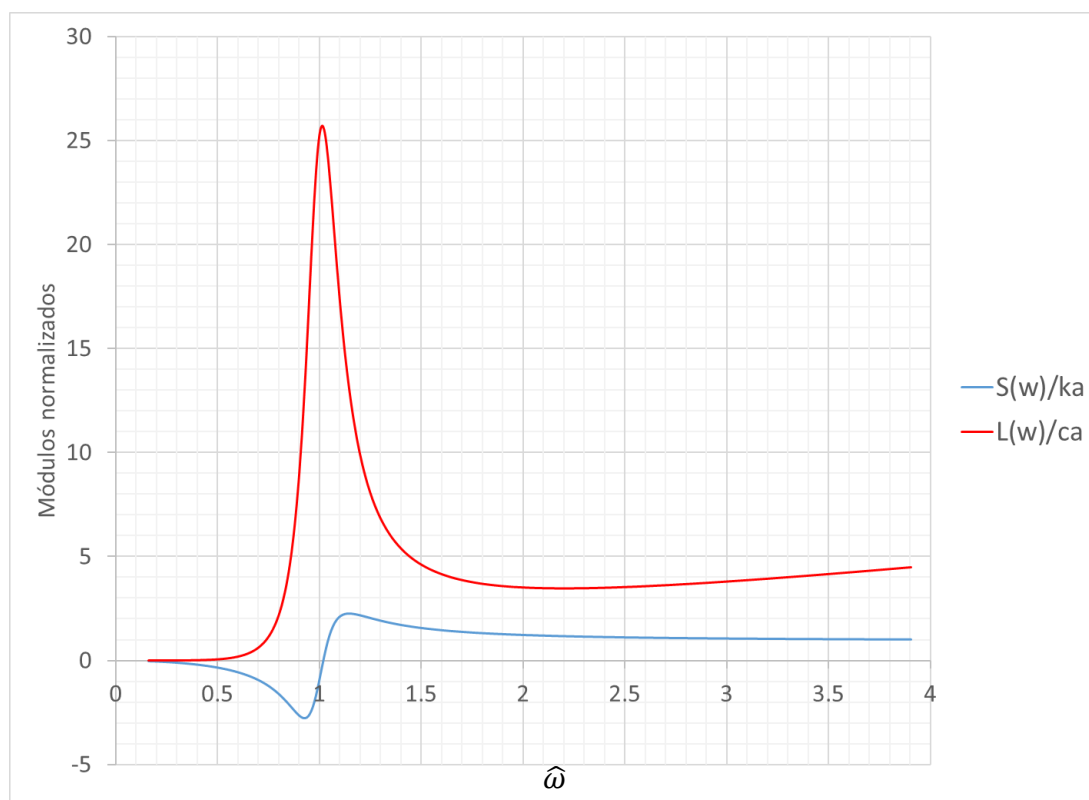


Figura II-3: AMS como disipador de energía.

Se aprecia que cuando la razón de frecuencias  $\hat{\omega} \cong 1.0$ , es decir cuando la frecuencia solicitante es similar a la frecuencia natural del aislador, la disipación de energía es máxima, por lo cual la eficiencia del AMS es fuertemente dependiente de este parámetro. La obtención de parámetros óptimos de diseño de los AMS depende de varios factores, asociados tanto a características de la estructura principal como al tipo de sollicitación como así también del criterio de optimización. El caso de AMS con y sin amortiguamiento, en ausencia de amortiguamiento en la estructura principal bajo

solicitaciones armónicas, fue estudiado por Den Hartog (Ormondroyd and Den Hartog, 1928), proponiendo una metodología para la obtención de los parámetros óptimos:  $k_a^{OP}$  y  $c_a^{OP}$ . El amortiguamiento en la estructura principal se incluyó en el análisis desarrollado por Bishop y Welbourn (1952). Jennige y Frohrib (1977) realizaron la evaluación numérica de un sistema de control de modos traslacionales y rotacionales. Ya entrando en la materia de este estudio, es decir el análisis de la respuesta torsional, Jangid y Datta (1997) estudiaron la efectividad de la utilización de múltiples amortiguadores de masa sintonizados (MAMS) para controlar la respuesta de estructuras acopladas torsionalmente en sistemas de dos grados de libertad. Lin et al (1999) propuso, como criterio para encontrar los parámetros de diseño de una estructura asimétrica de varios pisos equipada con dos AMS, minimizar la media cuadrática de la respuesta asociada al modo dominante. Distintos autores propusieron otros criterios, tales como maximizar la reducción de distintas respuestas como el corte basal, drifts de entrepiso, etc.

Almazán et al (2011) propone la obtención de los parámetros optimizados de un AMS, para estructuras asimétricas, a través de la aplicación del criterio de balance torsional general, lo que consiste en uniformizar la demanda de deformaciones, para reducir el daño asociado a la torsión, a través de minimizar el máximo de las deformaciones de entrepiso en los vértices de la estructura principal. En dicho estudio se concluye que el AMS se debe disponer, como regla general, en las cercanías del vértice donde la respuesta de la estructura original (sin AMS) es mayor. Lo anterior implica que para estructuras torsionalmente flexibles con pequeñas excentricidades, la ubicación óptima del AMS tiende a estar en las cercanías del vértice (o borde) rígido mientras que para estructuras torsionalmente rígidas con excentricidades medias o grandes, la ubicación óptima del AMS tiende a estar en las cercanías del vértice (o borde) más flexible. Además concluye que si la excitación es un proceso de banda ancha, las frecuencias propias del AMS deben sintonizarse con las frecuencias fundamentales traslacionales de la estructura original, y si la excitación es un proceso de banda angosta, las frecuencias propias del AMS deben sintonizarse con la frecuencia característica de la excitación. Por otra parte se concluye que el uso de AMS, reduce la respuesta torsional de la estructura que puede verificarse controlando el desplazamiento del vértice de mayor deformación.

### III. ANTECEDENTES

En este capítulo se presentan los parámetros, hipótesis y supuestos con los que se ha caracterizado el edificio y la modelación utilizada.

#### III.1. Caracterización del edificio.

##### III.1.1. General

La estructura bajo análisis corresponde al edificio denominado Edificio Santiago Norte, que se encuentra ubicado en la comuna de Conchalí, Centro Empresarial El Cortijo, en la ciudad de Santiago.

El edificio cuenta con 14 pisos más un nivel de subterráneo, se encuentra estructurado mediante muros de hormigón armado (en el núcleo de ascensores y distribuidos en planta) y marcos.



Figura III-1: fachada nororiente edificio Santiago Norte



Figura III-2: fachada surorientada edificio Santiago Norte.



Figura III-3: fachada poniente edificio Santiago Norte.

A continuación se presenta las plantas, elevaciones y cortes típicos del edificio analizado, obtenidos del modelo desarrollado en SAP2000:

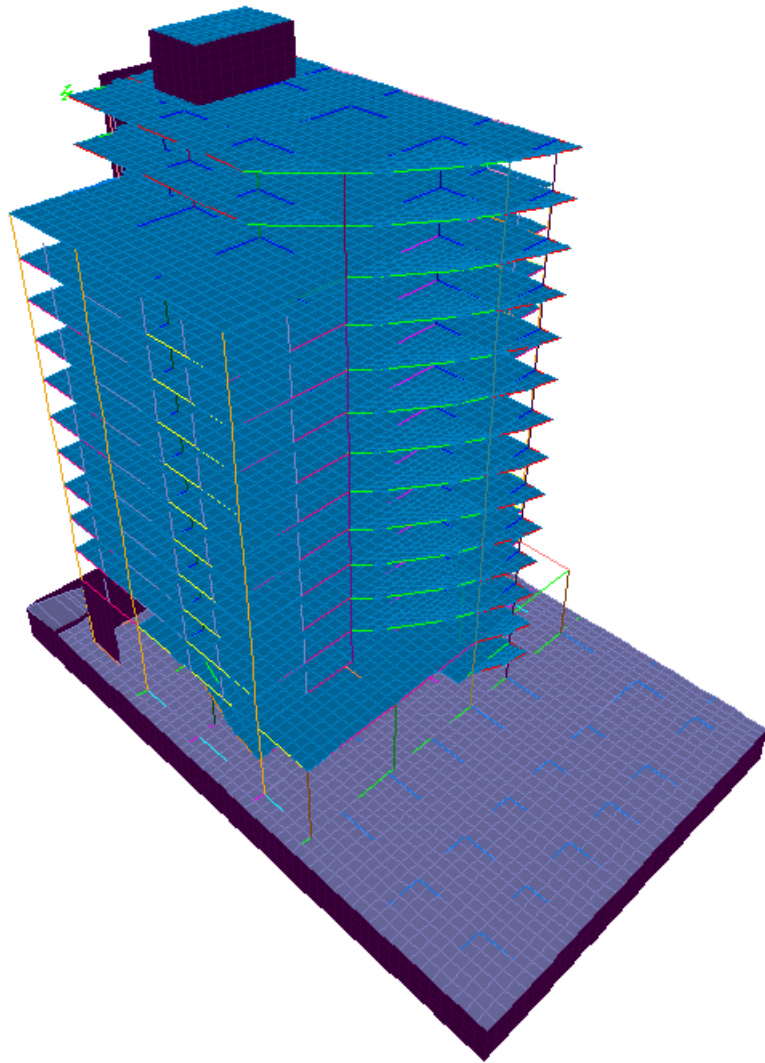


Figura III-4: isométrica de edificio en estudio.



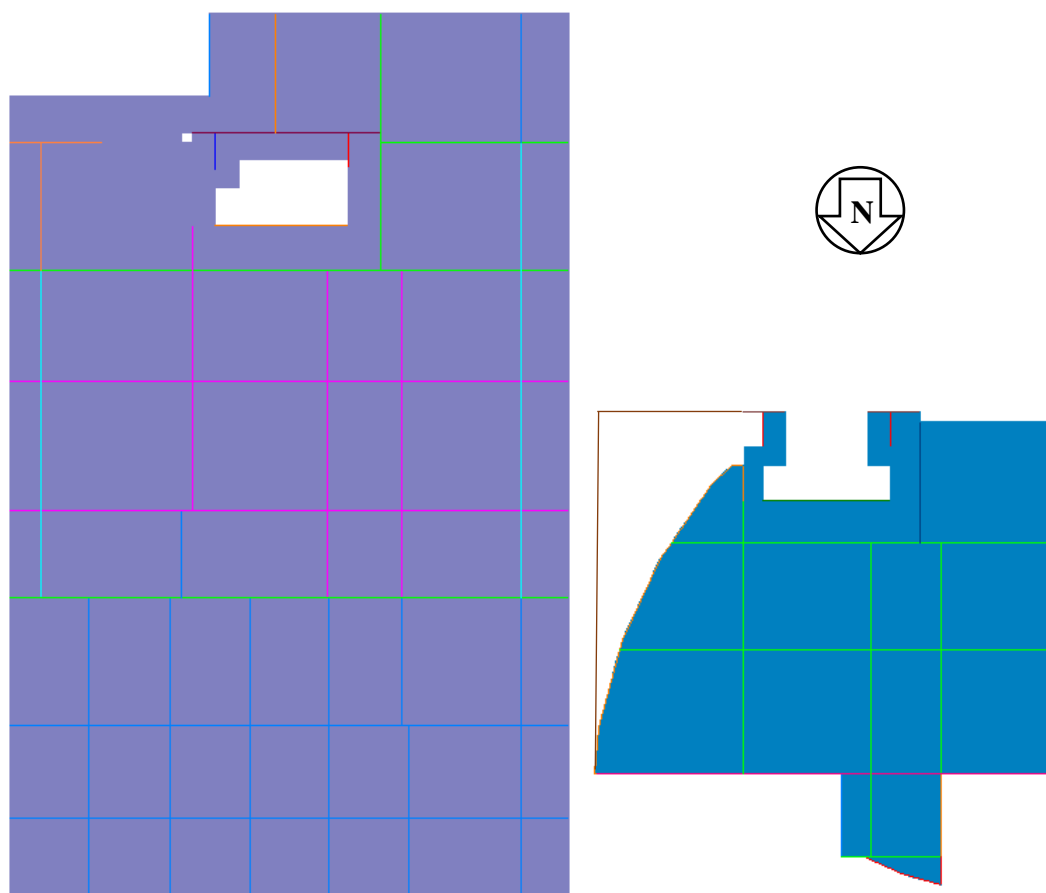


Figura III-5: planta estructura de cielo subterráneo (izquierda) y cielo primer piso (derecha).

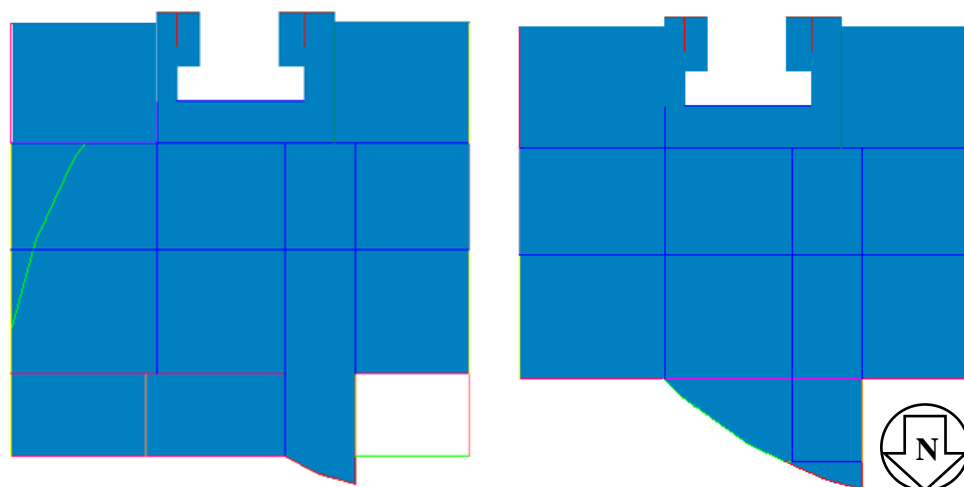


Figura III-6: planta estructura de cielo segundo piso (izquierda) y cielo tercer a duodécimo piso (derecha).

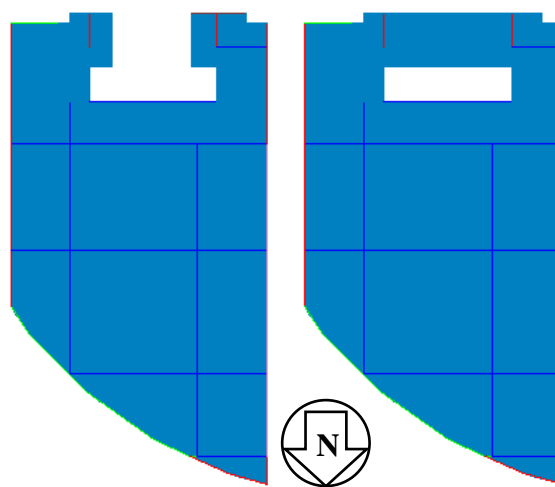


Figura III-7: planta estructura de cielo décimotercer piso (izquierda) y cielo décimocuarto piso (derecha).

### **III.1.2. Materiales.**

Los materiales que componen el edificio tienen las siguientes características:

Hormigón: calidad H-30, 90% de nivel de confianza.

Armaduras: calidad H630-420H

Acero estructural: calidad A240ES.

### III.1.3. Cargas.

Para efectos de desarrollo de este documento, se ha seleccionado las siguientes cargas:

a) Cargas muertas

Peso propio hormigón:  $2.50 \text{ t/m}^3$ .

Peso propio de estuco:  $2.00 \text{ t/m}^3$ .

Carga permanente losa:  $0.15 \text{ t/m}^2$ .

b) Cargas vivas.

Sobrecarga de uso en losa de estacionamiento:  $0.30 \text{ t/m}^2$ .

Sobrecarga de uso en losa de nivel intermedio:  $0.25 \text{ t/m}^2$ .

Sobrecarga de uso en losa de techo:  $0.1 \text{ t/m}^2$ .

c) Carga sísmica.

De acuerdo a la zonificación establecida en las normas de diseño sísmico chilenas, el edificio se encuentra emplazado en la zona sísmica 2 (que equivale a una aceleración basal efectiva  $A_0 = 0,40g$ ), suelo III,  $I=1,0$ . Para la determinación de la respuesta de la estructura, se ha considerado  $R_l = 2,0$  mientras que para la respuesta de los aisladores y deslizadores que componen el AMS se ha considerado  $R_l = 1,0$ .

La carga sísmica proviene de los siguientes registros sísmicos, obtenidos a partir de registros semilla compatibles con el espectro de diseño de la norma sísmica NCh2745Of.2003. Estos registros se han aplicado a los modelos habiendo sido previamente normalizados por sus respectivos PGA.

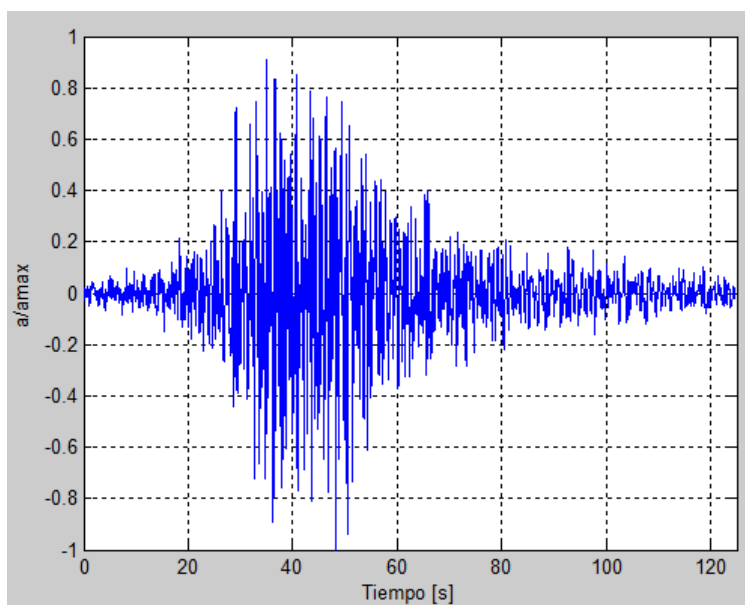


Figura III-8: Estación Lolleo, registro del sismo del Maule 2010,  
componente  $10^\circ$

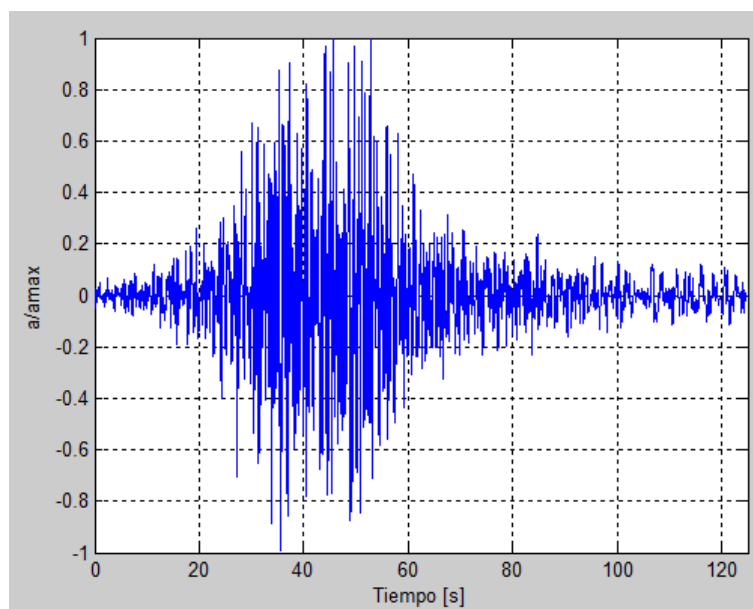


Figura III-9: Estación Lolleo, registro del sismo del Maule 2010,  
componente  $100^\circ$

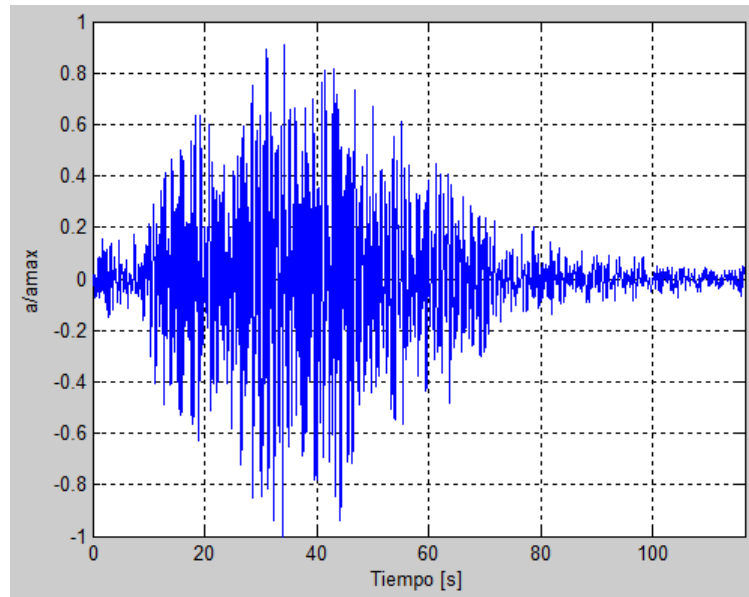


Figura III-10: Estación Lollole, registro del sismo de Lollole 1985, componente  $10^\circ$

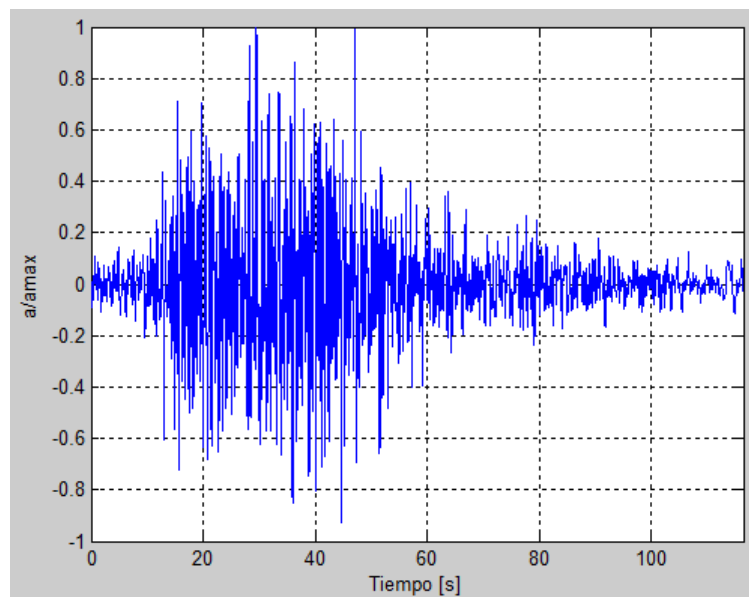


Figura III-11: Estación Lollole, registro del sismo de Lollole 1985, componente  $100^\circ$

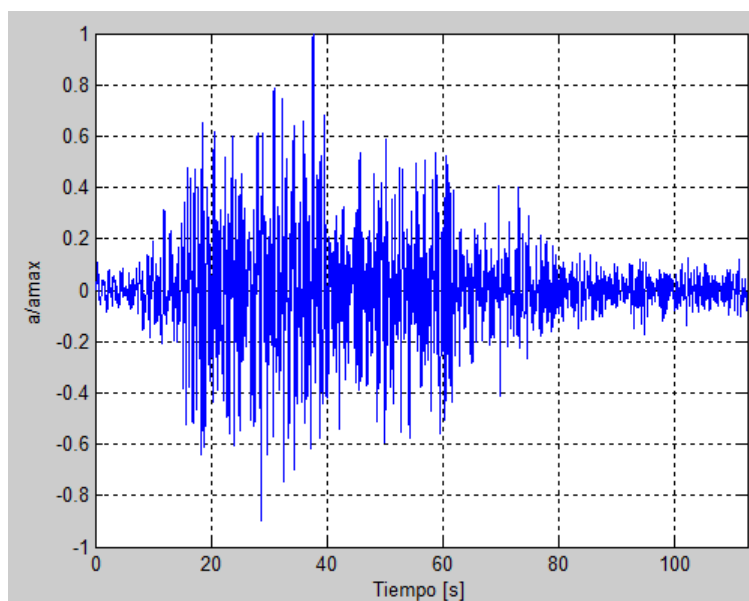


Figura III-12: Estación Viña del Mar, registro del sismo de Lolloo 1985, componente 200°

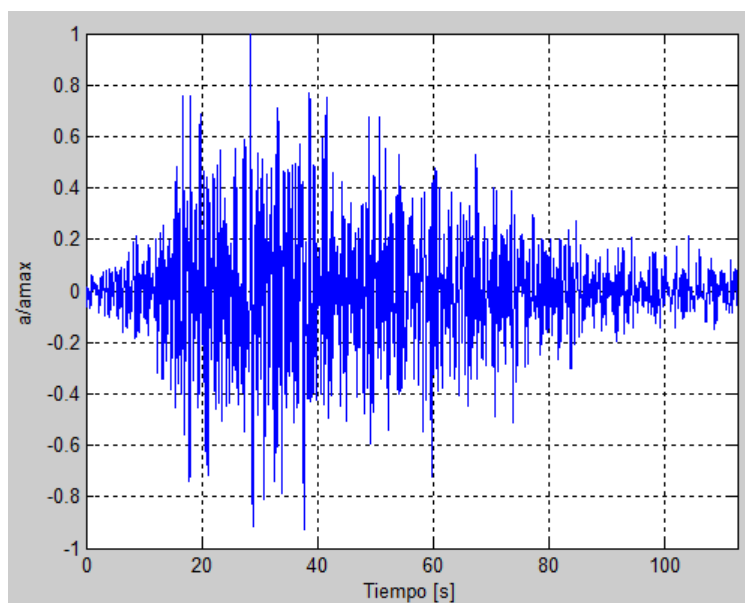


Figura III-13: Estación Viña del Mar, registro del sismo de Lolloo 1985, componente 290°

Los registros se han aplicado en pares ortogonales en forma alternada, generándose los siguientes pares:

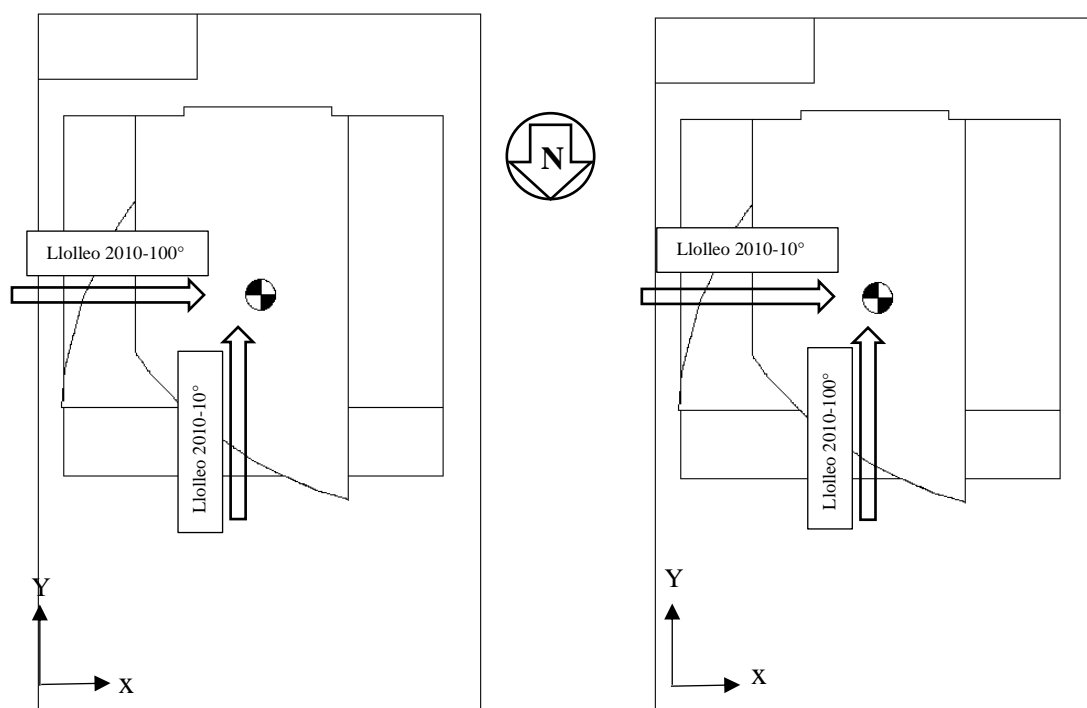


Figura III-14: Pares ortogonales: Lollo 2010-1 (izquierda) y Lollo 2010-2 (izquierda)



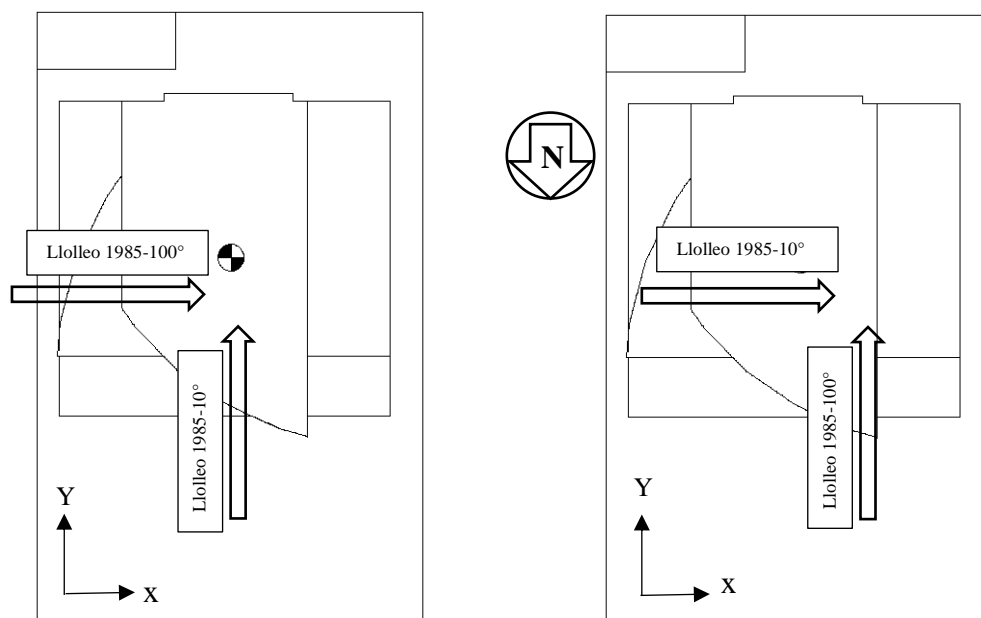


Figura III-15: Pares ortogonales: Lollole 1985-1 (izquierda) y Lollole 1985-2 (izquierda)

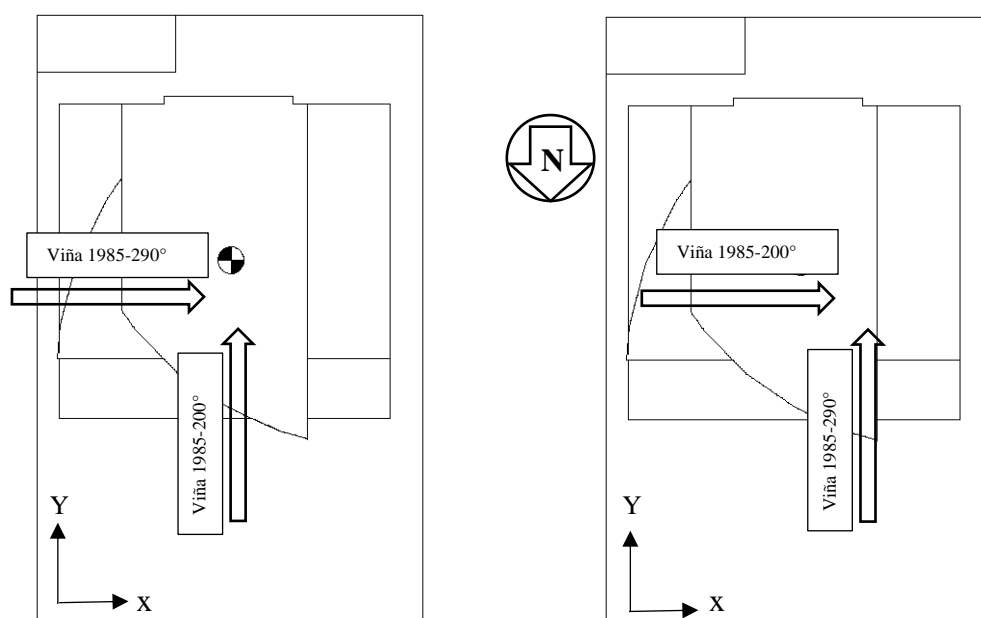


Figura III-16: Pares ortogonales: Viña 1985-1 (izquierda) y Viña 1985-2 (izquierda)

Dado que los espectros están normalizados, para ingresarlos al modelo han sido amplificados por el factor siguiente:

$$\text{Factor: } 0.40g/R_l \quad (3.1)$$

En el caso de la determinación de la respuesta del edificio, este factor toma el siguiente valor:

$$\text{Factor} = 0.40 \times 980 / 2.0 = 196$$

En el software SAP2000, los pares ortogonales se han ingresado como “load cases” de la siguiente forma:

Load Case Name: Llolleo2010-1

Load Case Type: Time History

Initial Conditions:  Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Modal Load Case: Use Modes from Case: MODAL

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	Llolleo2010_	196.
Accel	U1	Llolleo2010_10	196.
Accel	U2	Llolleo2010_100	196.

Time Step Data: Number of Output Time Steps: 27000, Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters: Modal Damping: Proportional Damping, Nonlinear Parameters: Default

Figura III-17: Definición de caso de carga Llolleo 2010-1 en SAP2000.

Load Case Name: Lolloe2010-2    Notes:    Load Case Type: Time History

Initial Conditions:  Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Modal Load Case: Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	Lolloe2010_	196.
Accel	U2	Lolloe2010_10	196.
Accel	U1	Lolloe1985_100	196.

Time Step Data: Number of Output Time Steps: 27000, Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters: Modal Damping: Proportional Damping, Nonlinear Parameters: Default

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Figura III-18: Definición de caso de carga Lolloe 2010-2 en SAP2000.

Load Case Name: Lolloe1985-1    Notes:    Load Case Type: Time History

Initial Conditions:  Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Modal Load Case: Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	Lolloe1985_	196.
Accel	U1	Lolloe1985_10	196.
Accel	U2	Lolloe1985_100	196.

Time Step Data: Number of Output Time Steps: 26000, Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters: Modal Damping: Proportional Damping, Nonlinear Parameters: Default

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Figura III-19: Definición de caso de carga Lolloe 1985-1 en SAP2000.

Load Case Name: Lolloe1985-2    Notes:    Load Case Type: Time History Design...

Initial Conditions:  Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State  
 Continue from State at End of Modal History

Modal Load Case: Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	Lolloe1985_	196.
Accel	U2	Lolloe1985_10	196.
Accel	U1	Lolloe1985_100	196.

Time Step Data: Number of Output Time Steps: 26000, Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters: Modal Damping: Proportional Damping, Nonlinear Parameters: Default

Buttons: Add, Modify, Delete, Show Advanced Load Parameters, OK, Cancel

Figura III-20: Definición de caso de carga Lolloe 1985-2 en SAP2000.

Load Case Name: Vina1985-1    Notes:    Load Case Type: Time History Design...

Initial Conditions:  Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State  
 Continue from State at End of Modal History

Modal Load Case: Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	Vina1985_2	196.
Accel	U1	Vina1985_200	196.
Accel	U2	Vina1985_290	196.

Time Step Data: Number of Output Time Steps: 25000, Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters: Modal Damping: Proportional Damping, Nonlinear Parameters: Default

Buttons: Add, Modify, Delete, Show Advanced Load Parameters, OK, Cancel

Figura III-21: Definición de caso de carga Viña 1985-1 en SAP2000.

Load Case Name: Vina1985-2    Set Def Name    Notes: Modify/Show...

Load Case Type: Time History    Design...

Initial Conditions:  
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State  
 Continue from State at End of Modal History

Analysis Type:  
 Linear  
 Nonlinear

Time History Type:  
 Modal  
 Direct Integration

Time History Motion Type:  
 Transient  
 Periodic

Modal Load Case:  
 Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	Vina1985_21	196.
Accel	U2	Vina1985_200	196.
Accel	U1	Vina1985_290	196.

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:  
 Number of Output Time Steps: 25000  
 Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters:  
 Modal Damping: Proportional Damping    Modify/Show...  
 Nonlinear Parameters: Default    Modify/Show...

Buttons: OK, Cancel

Figura III-22: Definición de caso de carga Viña 1985-2 en SAP2000.

### **III.2. Modelación edificio**

El edificio se ha modelado en SAP2000, versión 14.2.4.

Los elementos estructurales se han obtenido modelado de la siguiente forma:

Columnas: elementos frame.

Vigas: elementos frame.

Muros: elementos Shell.

Machones: elementos frame o Shell.

Cada planta corresponde a un diafragma rígido.

Se ha concentrado las masas en los centros de masa de cada piso. Para ello se ha realizado un análisis previo del edificio y obtenido los centros de masa y la magnitud de las masas concentradas.

El análisis de la sollicitación sísmica se ha realizado a través de un análisis tiempo-historia (HRT). El paso de tiempo del análisis, para todos los registros, se definió igual al paso de tiempo del registro, es decir 0,005 segundos.

Se consideró amortiguamiento proveniente de la estructura del tipo Rayleigh, es decir el amortiguamiento proviene de una combinación de la masa y la rigidez de la estructura. Para ello se consideró un amortiguamiento del 5% para el primer y último modo de la estructura.

Modal Damping Type

Constant Damping for all Modes  
 Interpolated Damping by Period or Frequency  
 Mass and Stiffness Proportional Damping by Coefficient

Mass and Stiffness Proportional Modal Damping by Coefficients:

Direct Specification  
 Specify Modal Damping by Period  
 Specify Modal Damping by Frequency

	Mass Proportional Coefficient	Stiffness Proportional Coefficient
Direct Specification		
Specify Modal Damping by Period	0.462	6.179E-04
Specify Modal Damping by Frequency		

	Period	Frequency	Damping
First	1.32		0.05
Second	0.04		0.05

Recalculate Coefficients

Modal Damping Overrides

Mode	Damping
1	0

Add

Modify

Delete

OK

Cancel

Figura III-23: Amortiguamiento tipo Rayleigh aplicado al modelo en SAP2000 (típico)

### III.3. Modelación AMS.

Por otra parte, en el caso del análisis HRT de la estructura con AMS, se ha considerado efectuar la precarga de las cargas gravitacionales, por dos motivos:

Para determinar las cargas axiales que toman los aisladores de goma, para efectos de su diseño posterior.

Para cargar y diseñar los deslizadores.

Asimismo, se consideró un amortiguamiento del 5% para los aisladores de goma.

## IV. METODOLOGÍA

### IV.1. Definición de los tipos de modelos.

Se ha realizado dos tipos de modelo: de la estructura original (sin AMS) y la estructura con AMS. El modelo de la estructura original se ha utilizado para determinar la respuesta estructural a controlar, como son los desplazamientos totales de los nodos de los extremos de la planta de elevación 48.05m (azotea) y los desplazamientos por piso, además de los resultados del análisis modal.

Los modelos de la estructura con AMS se subdividen de acuerdo a sus objetivos y, según éstos, se define su complejidad.

*Modelos tipo 1:* modelos destinados a definir las propiedades principales y ubicación del AMS en planta. Se modela este dispositivo como un elemento link único, ubicado en la planta de azotea (elevación 48.05m) con dos grados de libertad, vinculado a una masa en el extremo, ubicado en alguno de los puntos destacados con círculos rojos en la figura IV-1.

*Modelos tipo 2:* modelos destinados a medir tanto la respuesta de la estructura como del AMS. Corresponden a una losa vinculada con elementos link, representando los aisladores elastoméricos, con o sin deslizadores friccionales, ubicada en la planta de azotea.

### IV.2. Definición del criterio de evaluación de eficiencia del AMS.

Se ha definido dos criterios para determinar la eficiencia del AMS respecto a la reducción de la respuesta torsional. Ambos criterios se basan en la determinación de los desplazamientos totales medidos en vértices de las plantas del edificio. Por “desplazamientos totales” se define el módulo de los desplazamientos en X e Y.

En el caso de los modelos tipo 1, la eficiencia se ha determinado a través del nivel de reducción de los desplazamientos totales en los vértices de la planta a nivel de azotea (elevación 48.05m) dado que, según las conclusiones de Almazán et al (2011) (ver II.2) a través de la reducción de dichos desplazamientos puede controlarse la respuesta



torsional. Los desplazamientos se han medido en 4 vértices de la planta señalada, los que se muestran en el esquema a continuación:

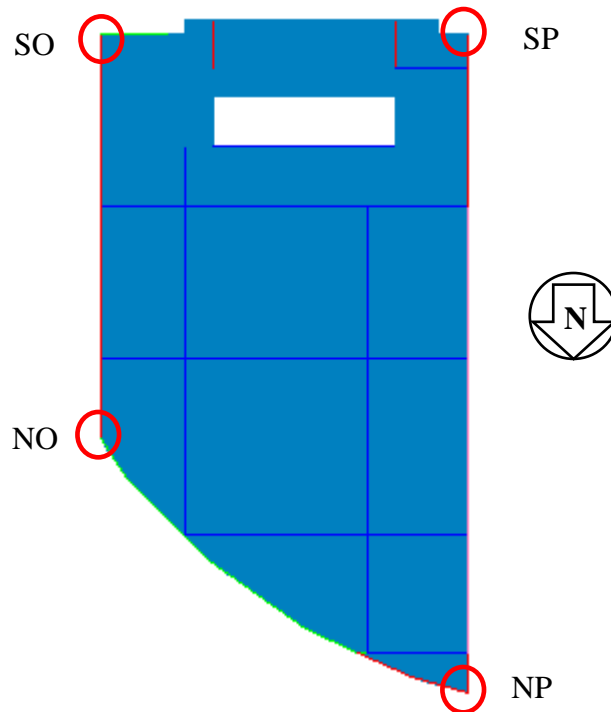


Figura IV-1: en los círculos rojos se presentan los nodos en la planta de elevación 48.05m, donde se ha medido los desplazamientos totales.

Para los modelos tipo 2, la eficiencia se ha determinado a través de la medición conjunta de dos parámetros:

- a) Desplazamiento total máximo por piso, determinado a partir de los desplazamientos totales en cada punto indicado en las figuras IV-2 y IV-3, para cada caso de carga.
- b) Desviación estándar máxima de los desplazamientos por piso, determinado a partir de los desplazamientos totales en cada vértice indicado en las figuras IV-2 y IV-3, para cada caso de carga. Con este parámetro se medirá la eficiencia del control de la torsión del AMS: cuando la desviación estándar de los desplazamientos por piso tiende a cero, no hay dispersión en los desplazamientos de los vértices del piso, lo que a su vez implica que la planta se desplaza sin girar. La estructura con AMS debería entregar magnitudes menores de la desviación estándar que en el caso de la estructura original.

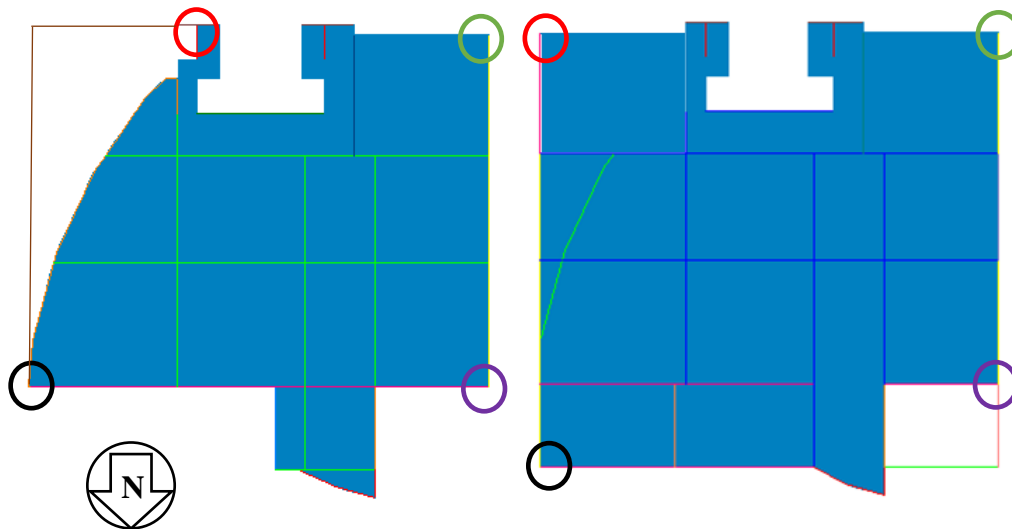


Figura IV-2: puntos de medición de los desplazamientos totales de piso, planta estructura de cielo primer piso (izquierda) y de cielo segundo piso (derecha).

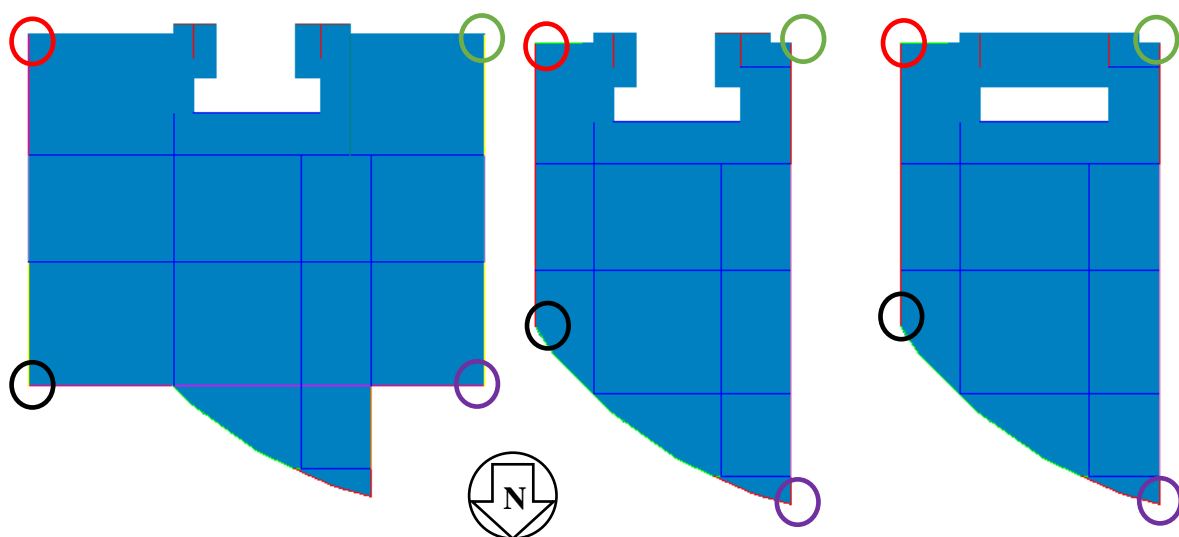


Figura IV-3: puntos de medición de los desplazamientos totales de piso, planta estructura y cielo tercer a duodécimo piso (izquierda), cielo décimoterter piso (centro) y cielo décimocuarto piso (derecha).

### IV.3. Definición de los modelos.

Modelo AMS0: modelo tipo 1. Su objetivo es la determinación de la masa del AMS que genera la mayor reducción de la respuesta torsional de la estructura para uno de los pares de registros sísmicos ortogonales (casos de carga) mencionados. En este caso se ha seleccionado, a priori, los casos de carga Lolleo 2010-1 y Lolleo 2010-2. Asimismo, para este caso en particular, la rigidez y el amortiguamiento del AMS se han obtenido a partir la sintonía con la frecuencia fundamental asociada al modo torsional de la estructura principal y suponiendo un amortiguamiento del 5% del amortiguamiento crítico para este dispositivo. Las masas a evaluar son del 1, 2, 3, 4 y 5% de la masa translacional del edificio, asociadas a los modelos AMS0-1 a AMS0-5, respectivamente. El AMS se ha dispuesto en el punto “SO” de la figura IV-1.

Modelo AMS1: modelo tipo 1. Su objetivo es la determinación de la rigidez lateral del AMS que genera la mayor reducción de la respuesta torsional de la estructura para uno de los pares de registros sísmicos ortogonales (casos de carga) mencionados. En este caso se ha seleccionado, a priori, los casos de carga Lolleo 2010-1 y Lolleo 2010-2. El AMS, que se ha dispuesto en el punto “SO” de la figura IV-1, se ha sintonizado respecto a distintas combinaciones de frecuencias provenientes del análisis modal de la estructura principal:

AMS1-1: se ha sintonizado sus dos componentes traslacionales respecto a la frecuencia de la estructura original en Y.

AMS1-2: se ha sintonizado sus dos componentes traslacionales respecto a la frecuencia de la estructura original en X.

AMS1-3: se ha sintonizado sus dos componentes traslacionales respecto a la frecuencia de la estructura original en Z.

AMS1-4: se ha sintonizado sus dos componentes traslacionales respecto al promedio de la frecuencia de la estructura original en X e Y.

AMS1-5: se ha sintonizado sus componentes traslacionales respecto a la frecuencia en dirección paralela de la estructura original en X e Y.

Modelo AMS2: modelo tipo 1. Su objetivo es determinar la ubicación en planta del AMS que genera una mayor reducción de la respuesta torsional para uno de los pares de registros sísmicos ortogonales (casos de carga) mencionados. En este caso se ha seleccionado, a priori, los casos de carga Llolleo 2010-1 y Llolleo 2010-2. El AMS determinado previamente en el modelo AMS1, se dispone en los extremos de la planta de azotea:

AMS2-1: el AMS se ubica en el extremo suroriente (SO).

AMS2-2: el AMS se ubica en el extremo sur poniente (SP).

AMS2-3: el AMS se ubica en el extremo norponiente (NP).

AMS2-4: el AMS se ubica en el extremo nororiente (NO).

Los puntos anteriormente señalados se resumen en la figura IV-1.

Modelo AMS3: modelo tipo 2. Este modelo contempla el uso de aisladores de goma y su objetivo es obtener la respuesta de la estructura (desplazamientos) y del AMS (desplazamientos y fuerzas) que permitan el diseño de los aisladores de goma. El AMS se ha modelado como una losa vinculada con 5 aisladores para los que, tanto las propiedades de los mismos como la ubicación del AMS en planta, se han definido en los modelos anteriores.

Modelo AMS4: modelo tipo 2. Este modelo contempla el uso de aisladores de goma y deslizadores y su objetivo es obtener la respuesta de la estructura (desplazamientos) y del AMS (desplazamientos y fuerzas) que permitan el diseño de los aisladores de goma y disipadores. El AMS se ha modelado como una losa vinculada con 5 aisladores y 5 disipadores.

## V. RESULTADOS.

En el presente capítulo se aborda los resultados de las modelaciones.

### V.1. Edificio original (sin AMS)

Los resultados del análisis modal se presentan en la siguiente tabla:

Tabla V-1: Resultados análisis modal: períodos, factores de masa participativa modal en dirección X, Y y en torno al eje Z.

Modo	Periodo Sec	UX	UY	RZ
1	1.30	0.05	0.57	0.03
2	1.18	0.43	0.09	0.11
3	0.61	0.17	0.00	0.43
4	0.40	0.05	0.06	0.01
5	0.37	0.05	0.07	0.00
6	0.23	0.02	0.00	0.02
7	0.20	0.00	0.04	0.01
8	0.18	0.07	0.00	0.04
9	0.17	0.00	0.00	0.03
10	0.13	0.00	0.02	0.00

De la tabla anterior se aprecia los períodos fundamentales de la estructura son:

En dirección Y: 1.30 segundos (modo 1)

En dirección X: 1.18 segundos (modo 2)

En torno al eje Z: 0.61 segundos (modo 3)

Los máximos de los desplazamientos totales en la planta de azotea, obtenidos para cada par ortogonal de registros sísmicos (casos de carga) aplicados al modelo, se presenta en la tabla V-2. Tal como se indicó en el punto III.4.3, para la determinación de la respuesta de la estructura, se ha considerado  $R_l = 2,0$ .

Tabla V-2: Máximo desplazamiento total de la estructura en planta de elevación 48.05m

Ubicación nodo	Máximo desplazamiento total (cm)					
	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
SP	26.03	22.58	19.26	23.22	16.10	17.66
NP	26.75	26.59	32.91	28.58	25.76	20.94
NO	29.80	19.29	30.25	25.16	26.46	23.40
SO	30.38	20.33	22.66	21.90	22.37	23.34

## **V.2. Edificio con AMS compuesto sólo por aisladores elastoméricos.**

Tal como se explicó en el procedimiento, la obtención de los parámetros óptimos de diseño del AMS se ha realizado secuencialmente definiendo la masa, amortiguamiento, rigidez y ubicación en planta del AMS.

### **V.2.1. Determinación de la masa del AMS.**

La determinación de las masas del AMS, según lo indicado en IV.3, se presenta a continuación:

Tabla V-3: propiedades de AMS para definir la masa.

	AMS0-1	AMS0-2	AMS0-3	AMS0-4	AMS0-5
T (s)	0.615	0.615	0.615	0.615	0.615
$\xi$	0.05	0.050	0.050	0.050	0.050
$\mu$ (%)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
$\omega$ (cps)	10.22	10.22	10.22	10.22	10.22
ma (tonf*s <sup>2</sup> /m)	16.06	32.12	48.19	64.25	80.31
ka (tonf/m)	1676.53	3353.06	5029.60	6706.13	8382.66
ca (tonf*s/m)	16.41	32.82	49.23	65.64	82.05

Donde  $\mu$  corresponde a la razón de masas (masa translacional del AMS / masa translacional de la estructura principal) del AMS.

El ingreso de estos datos al modelo desarrollado en SAP2000 se realizó de la siguiente forma:

Figura V-1: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-1.



Link/Support Name LIN2%		Stiffness Values Used For All Load Cases <input checked="" type="radio"/> Stiffness Is Uncoupled <input type="radio"/> Stiffness Is Coupled					
Directional Control		U1	U2	U3	R1	R2	R3
Direction	Fixed	Fixed	3353.06	3353.06	Fixed	Fixed	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>						
Shear Distance from End J		Damping Values Used For All Load Cases <input checked="" type="radio"/> Damping Is Uncoupled <input type="radio"/> Damping Is Coupled					
U2	0.	U1	U2	U3	R1	R2	R3
U3	0.	Fixed	32.82	32.82	Fixed	Fixed	Fixed
Units		Tonf, m, C					
		OK    Cancel					

Figura V-2: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-2.

Link/Support Name LIN3%		Stiffness Values Used For All Load Cases <input checked="" type="radio"/> Stiffness Is Uncoupled <input type="radio"/> Stiffness Is Coupled					
Directional Control		U1	U2	U3	R1	R2	R3
Direction	Fixed	Fixed	5029.6	5029.6	Fixed	Fixed	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>						
Shear Distance from End J		Damping Values Used For All Load Cases <input checked="" type="radio"/> Damping Is Uncoupled <input type="radio"/> Damping Is Coupled					
U2	0.	U1	U2	U3	R1	R2	R3
U3	0.	Fixed	49.23	49.23	Fixed	Fixed	Fixed
Units		Tonf, m, C					
		OK    Cancel					

Figura V-3: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-3.

Link/Support Name LIN4%		Stiffness Values Used For All Load Cases					
Directional Control		<input checked="" type="radio"/> Stiffness Is Uncoupled			<input type="radio"/> Stiffness Is Coupled		
Direction	Fixed	U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Fixed	6706.13	6706.13	Fixed	Fixed	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
Shear Distance from End J		Damping Values Used For All Load Cases					
U2	0.	<input checked="" type="radio"/> Damping Is Uncoupled			<input type="radio"/> Damping Is Coupled		
U3	0.	U1	U2	U3	R1	R2	R3
		Fixed	65.64	65.64	Fixed	Fixed	Fixed
Units		Tonf. m. C					
		OK Cancel					

Figura V-4: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-4.

Link/Support Name LIN5%		Stiffness Values Used For All Load Cases					
Directional Control		<input checked="" type="radio"/> Stiffness Is Uncoupled			<input type="radio"/> Stiffness Is Coupled		
Direction	Fixed	U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Fixed	8382.66	8382.66	Fixed	Fixed	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
Shear Distance from End J		Damping Values Used For All Load Cases					
U2	0.	<input checked="" type="radio"/> Damping Is Uncoupled			<input type="radio"/> Damping Is Coupled		
U3	0.	U1	U2	U3	R1	R2	R3
		Fixed	82.05	82.05	Fixed	Fixed	Fixed
Units		Tonf. m. C					
		OK Cancel					

Figura V-5: definición de propiedades de AMS modelado como elemento link de dos nodos. AMS0-5.

Se verifica, en forma indirecta, la reducción en la respuesta torsional de la estructura a través de la reducción de los desplazamientos totales en los vértices de la planta de azotea. Los máximos de los desplazamientos totales en la planta de azotea, obtenidos para los casos de carga indicados en IV-3 y aplicados los modelos AMS1-1 a AMS1-5, y su comparación con los obtenidos para el edificio original, se entregan en las siguientes tablas:

Tabla V-4: Máximos desplazamientos totales en planta de azotea  
para caso de carga Llolleo 2010-1

Ubicación nodo	Original cm	AMS0-1 cm	AMS0-2 cm	AMS0-3 cm	AMS0-4 cm	AMS0-5 cm
SP	26.03	25.21	22.61	19.88	20.29	20.94
NP	26.75	28.71	30.91	31.31	32.57	32.38
NO	29.80	26.99	26.10	26.91	28.78	28.53
SO	30.38	26.84	26.10	25.54	27.27	26.85

Tabla V-5: Máximos desplazamientos totales en planta de azotea  
para caso de carga Llolleo 2010-2

Ubicación nodo	Original cm	AMS0-1 cm	AMS0-2 cm	AMS0-3 cm	AMS0-4 cm	AMS0-5 cm
SP	22.58	22.28	21.96	21.50	20.90	19.98
NP	26.59	23.73	22.95	23.79	24.18	24.14
NO	19.29	20.71	21.30	20.02	19.30	20.38
SO	20.33	20.32	21.20	19.81	19.31	19.03

La reducción del desplazamiento, presentada en la tabla a continuación, se ha determinado a partir de la siguiente fórmula:

$$\%Red_{AMS0-N} = \frac{\Delta_{S/AMS} - \Delta_{AMS1-N}}{\Delta_{S/AMS}} 100 \quad (5.1)$$

Donde:

$\%Red_{AMS1-N}$ : porcentaje de reducción de los desplazamientos para el AMS0-N

$\Delta_{S/AMS}$ : desplazamiento de la estructura original (sin AMS)

$\Delta_{AMS0-N}$ : desplazamiento de la estructura para el AMS1-N, con N del 1 al 5 (ver punto IV.3)

Tabla V-6: reducción en los desplazamientos totales para cada AMS, para Llolleo 2010-1.

Ubicación nodo	AMS0-1 %	AMS0-2 %	AMS0-3 %	AMS0-4 %	AMS0-5 %
SP	3.13	13.12	23.61	22.03	19.54
NP	-7.32	-15.56	-17.03	-21.74	-21.05
NO	9.43	12.44	9.71	3.41	4.28
SO	11.64	14.08	15.94	10.24	11.60
Promedio	4.22	6.02	8.06	3.49	3.59

Tabla V-7: reducción en los desplazamientos totales para cada AMS, para Llolleo 2010-2.

Ubicación nodo	AMS0-1 %	AMS0-2 %	AMS0-3 %	AMS0-4 %	AMS0-5 %
SP	1.33	2.74	4.81	7.45	11.52
NP	10.72	13.68	10.53	9.04	9.20
NO	-7.37	-10.43	-3.77	-0.03	-5.63
SO	0.04	-4.31	2.55	5.01	6.38
Promedio	1.18	0.42	3.53	5.37	5.37

Al evaluar, en los vértices con mayor desplazamiento (SO en la tabla V-6 y NP en tabla V-7), la reducción de los desplazamientos, se ha seleccionado el modelo AMS0-3 ( $\mu = 3\%$ ) dado que genera una razón masa/reducción de desplazamiento considerable sin aumentar excesivamente la masa del AMS.

### V.2.2. Determinación de la rigidez y amortiguamiento del AMS.

La determinación de las propiedades señaladas de los aisladores elastoméricos se presenta a continuación:

Tabla V-8: propiedades de aisladores elastoméricos.

	AMS1-1	AMS1-2	AMS1-3	AMS1-4	AMS1-5	
	En X e Y	En X e Y	En X e Y	En X e Y	En X	En Y
T (s)	0.615	1.301	1.176	1.239	1.176	1.301
$\xi$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$\omega$ (cps)	10.22	4.83	5.34	5.07	5.34	4.83
ka (tonf/m)	5029.60	1123.10	1375.73	1239.82	1375.73	1123.10
ca (tonf*s/m)	49.23	23.26	25.75	24.44	25.75	23.26

Masa del aislador: 3% de la masa del edificio (equivalente a 48.19 tonf), determinada en el punto anterior.

El ingreso de estos datos al modelo desarrollado en SAP2000 se realizó de la siguiente forma:

Link/Support Name AMS1-1		Stiffness Values Used For All Load Cases					
Directional Control		<input checked="" type="radio"/> Stiffness Is Uncoupled			<input type="radio"/> Stiffness Is Coupled		
Direction	Fixed	U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	Fixed	5029.6	5029.6	Fixed	Fixed	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>						
Shear Distance from End J		Damping Values Used For All Load Cases					
U2	0.	<input checked="" type="radio"/> Damping Is Uncoupled			<input type="radio"/> Damping Is Coupled		
U3	0.	U1	U2	U3	R1	R2	R3
		Fixed	49.23	49.23	Fixed	Fixed	Fixed
Units		Tonf, m, C					
		OK Cancel					

Figura V-6: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-1.

Link/Support Name AMS1-2		Stiffness Values Used For All Load Cases					
Directional Control		<input checked="" type="radio"/> Stiffness Is Uncoupled			<input type="radio"/> Stiffness Is Coupled		
Direction	Fixed	U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	Fixed	1123.1	1123.1	Fixed	Fixed	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>						
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>						
Shear Distance from End J		Damping Values Used For All Load Cases					
U2	0.	<input checked="" type="radio"/> Damping Is Uncoupled			<input type="radio"/> Damping Is Coupled		
U3	0.	U1	U2	U3	R1	R2	R3
		Fixed	23.26	23.26	Fixed	Fixed	Fixed
Units		Tonf, m, C					
		OK Cancel					

Figura V-7: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-2

Link/Support Name AMS1-3		Stiffness Values Used For All Load Cases <input checked="" type="radio"/> Stiffness Is Uncoupled <input type="radio"/> Stiffness Is Coupled <table border="1"> <thead> <tr> <th>U1</th> <th>U2</th> <th>U3</th> <th>R1</th> <th>R2</th> <th>R3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fixed</td> <td>1375.73</td> <td>1375.73</td> <td>Fixed</td> <td>Fixed</td> <td>Fixed</td> </tr> </tbody> </table>						U1	U2	U3	R1	R2	R3	Fixed	1375.73	1375.73	Fixed	Fixed	Fixed														
U1	U2	U3	R1	R2	R3																												
Fixed	1375.73	1375.73	Fixed	Fixed	Fixed																												
Directional Control <table border="1"> <thead> <tr> <th>Direction</th> <th>Fixed</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> U1</td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> U2</td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> U3</td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> R1</td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> R2</td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> R3</td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> </tbody> </table>		Direction	Fixed	<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>	Damping Values Used For All Load Cases <input checked="" type="radio"/> Damping Is Uncoupled <input type="radio"/> Damping Is Coupled <table border="1"> <thead> <tr> <th>U1</th> <th>U2</th> <th>U3</th> <th>R1</th> <th>R2</th> <th>R3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fixed</td> <td>25.75</td> <td>25.75</td> <td>Fixed</td> <td>Fixed</td> <td>Fixed</td> </tr> </tbody> </table>						U1	U2	U3	R1	R2	R3	Fixed	25.75	25.75	Fixed	Fixed	Fixed
Direction	Fixed																																
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>																																
U1	U2	U3	R1	R2	R3																												
Fixed	25.75	25.75	Fixed	Fixed	Fixed																												
Shear Distance from End J U2: 0. U3: 0.																																	
Units Tonf. m. C																																	
		<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>																															

Figura V-8: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-3.

Link/Support Name AMS1-4		Stiffness Values Used For All Load Cases <input checked="" type="radio"/> Stiffness Is Uncoupled <input type="radio"/> Stiffness Is Coupled <table border="1"> <thead> <tr> <th>U1</th> <th>U2</th> <th>U3</th> <th>R1</th> <th>R2</th> <th>R3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fixed</td> <td>1239.82</td> <td>1239.82</td> <td>Fixed</td> <td>Fixed</td> <td>Fixed</td> </tr> </tbody> </table>						U1	U2	U3	R1	R2	R3	Fixed	1239.82	1239.82	Fixed	Fixed	Fixed														
U1	U2	U3	R1	R2	R3																												
Fixed	1239.82	1239.82	Fixed	Fixed	Fixed																												
Directional Control <table border="1"> <thead> <tr> <th>Direction</th> <th>Fixed</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> U1</td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> U2</td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> U3</td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> R1</td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> R2</td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> R3</td><td><input checked="" type="checkbox"/></td></tr> </tbody> </table>		Direction	Fixed	<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>	Damping Values Used For All Load Cases <input checked="" type="radio"/> Damping Is Uncoupled <input type="radio"/> Damping Is Coupled <table border="1"> <thead> <tr> <th>U1</th> <th>U2</th> <th>U3</th> <th>R1</th> <th>R2</th> <th>R3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fixed</td> <td>24.44</td> <td>24.44</td> <td>Fixed</td> <td>Fixed</td> <td>Fixed</td> </tr> </tbody> </table>						U1	U2	U3	R1	R2	R3	Fixed	24.44	24.44	Fixed	Fixed	Fixed
Direction	Fixed																																
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>																																
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>																																
U1	U2	U3	R1	R2	R3																												
Fixed	24.44	24.44	Fixed	Fixed	Fixed																												
Shear Distance from End J U2: 0. U3: 0.																																	
Units Tonf. m. C																																	
		<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>																															

Figura V-9: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-4.

Link/Support Name  
AMS1-5

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled     Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
Fixed	1375.73	1123.1	Fixed	Fixed	Fixed

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled     Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
Fixed	25.75	23.26	Fixed	Fixed	Fixed

Shear Distance from End J

U2: 0

U3: 0

Units  
Tonf, m, C

OK    Cancel

Figura V-10: definición de propiedades de AMS modelados como elemento link de dos nodos. AMS1-5.

Se verifica, en forma indirecta, la reducción en la respuesta torsional de la estructura a través de la reducción de los desplazamientos totales en los vértices de la planta de azotea. Los máximos de los desplazamientos totales en la planta de azotea, obtenidos para los casos de carga indicados en IV-3 y aplicados los modelos AMS1-1 a AMS1-5, y su comparación con los obtenidos para el edificio original, se entregan en la siguiente tabla:



Tabla V-9: Máximos desplazamientos totales en planta de azotea para caso de carga Llolleo 2010-1

Ubicación nodo	Original cm	AMS1-1 cm	AMS1-2 cm	AMS1-3 cm	AMS1-4 cm	AMS1-5 cm
SP	26.03	19.88	17.00	17.27	17.49	16.58
NP	26.75	31.31	24.21	23.27	23.39	22.62
NO	29.80	26.91	17.71	21.47	19.59	17.87
SO	30.38	25.54	18.15	21.61	20.06	18.32

Tabla V-10: Máximos desplazamientos totales en planta de azotea para caso de carga Llolleo 2010-2

Ubicación nodo	Original cm	AMS1-1 cm	AMS1-2 cm	AMS1-3 cm	AMS1-4 cm	AMS1-5 cm
SP	22.58	21.50	14.41	15.39	13.90	14.57
NP	26.59	23.79	22.77	23.38	22.76	23.18
NO	19.29	20.02	14.52	16.49	14.59	14.92
SO	20.33	19.81	13.60	16.99	14.97	13.61

La reducción del desplazamiento, presentada en la tabla a continuación, se ha determinado a partir de la siguiente fórmula:

$$\%Red_{AMS1-N} = \frac{\Delta_{S/AMS} - \Delta_{AMS1-N}}{\Delta_{S/AMS}} 100 \quad (5.2)$$

Donde:

$\%Red_{AMS1-N}$ : porcentaje de reducción de los desplazamientos para el AMS1-N

$\Delta_{S/AMS}$ : desplazamiento de la estructura original (sin AMS)

$\Delta_{AMS1-N}$ : desplazamiento de la estructura para el AMS1-N, con N del 1 al 5 (ver punto IV.3)

Tabla V-11: reducción en los desplazamientos totales para cada AMS, para Llolleo 2010-1.

Ubicación nodo	AMS1-1 %	AMS1-2 %	AMS1-3 %	AMS1-4 %	AMS1-5 %
SP	23.61	34.67	33.65	32.81	36.28
NP	-17.03	9.49	13.02	12.57	15.43
NO	9.71	40.57	27.94	34.27	40.03
SO	15.94	40.26	28.86	33.95	39.70
Promedio	8.06	31.25	25.87	28.40	32.86

Tabla V-12: reducción en los desplazamientos totales para cada AMS, para Llolleo 2010-2.

Ubicación nodo	AMS1-1 %	AMS1-2 %	AMS1-3 %	AMS1-4 %	AMS1-5 %
SP	4.81	36.17	31.84	35.47	38.44
NP	10.53	14.34	12.05	12.80	14.38
NO	-3.77	24.73	14.50	22.65	24.35
SO	2.55	33.07	16.43	33.04	26.36
Promedio	3.53	27.08	18.70	25.99	25.88

Al evaluar, en los vértices con mayor desplazamiento (SO en la tabla V-11 y NP en tabla V-12), la reducción de los desplazamientos, se ha seleccionado el modelo AMS1-5, es decir:

Tabla V-13: propiedades de aisladores elastoméricos.

	AMS1-5	
	En X	En Y
T (s)	1.176	1.301
$\xi$	0.05	0.05
$\omega$ (cps)	5.34	4.83
ka (tonf/m)	1375.73	1123.10
ca (tonf*s/m)	25.75	23.26

### V.2.3. Determinación de la ubicación en planta del AMS.

Se verifica, en forma indirecta, la reducción en la respuesta torsional de la estructura a través la reducción de los desplazamientos totales en los vértices de la planta de azotea. Los desplazamientos totales máximos de la planta de elevación 48,05m de los modelos AMS2-1 a AMS2-4, utilizados para determinar la ubicación del AMS, y su comparación con los obtenidos para el edificio original, se entregan en la siguiente tabla:

Para el sismo Lolleo 2010 -1 se tiene:

Tabla V-14: Máximos desplazamientos totales para edificio original y con AMS, según posición en planta del AMS.

Ubicación nodo	Original cm	AMS2-1 cm	AMS2-2 cm	AMS2-3 cm	AMS2-4 cm
SP	26.03	16.62	17.95	15.04	15.14
NP	26.75	22.64	29.09	21.11	21.40
NO	29.80	18.02	25.30	23.25	21.81
SO	30.38	18.45	22.64	20.67	18.82

Tabla V-15: reducción en los máximos desplazamientos totales para según posición en planta del AMS.

Ubicación nodo	AMS2-1 %	AMS2-2 %	AMS2-3 %	AMS2-4 %
SP	36.13	31.01	42.21	41.84
NP	15.36	-8.72	21.09	20.00
NO	39.55	15.10	22.00	26.81
SO	39.25	25.47	31.97	38.06
Promedio	32.57	15.71	29.32	31.67

Para el sismo Lolleo 2010 -2 se tiene:

Tabla V-16: Máximos desplazamientos totales para edificio original y con AMS, según posición en planta del AMS.

Ubicación nodo	Original cm	AMS2-1 cm	AMS2-2 cm	AMS2-3 cm	AMS2-4 cm
SP	22.58	14.57	14.11	14.71	15.28
NP	26.59	23.24	20.99	15.49	20.95
NO	19.29	14.95	18.75	15.88	14.72
SO	20.33	13.59	15.92	14.49	13.43

Tabla V-17: reducción en los máximos desplazamientos totales para según posición en planta del AMS.

Ubicación nodo	AMS2-1 %	AMS2-2 %	AMS2-3 %	AMS2-4 %
SP	35.48	37.53	34.87	32.34
NP	12.60	21.06	41.74	21.18
NO	22.50	2.79	17.68	23.71
SO	33.14	21.68	28.70	33.91
Promedio	25.93	20.77	30.75	27.79

Al evaluar, en los vértices con mayor desplazamiento (SO en la tabla V-16 y NP en tabla V-17), la reducción de los desplazamientos, se ha seleccionado el modelo AMS2-3 (AMS ubicado en el vértice NO).

### V.2.4. Determinación de las propiedades del AMS, modelo final.

a) Ubicación en planta.

De acuerdo a lo obtenido en IV.9.2, la ubicación en planta para el AMS final es la siguiente:

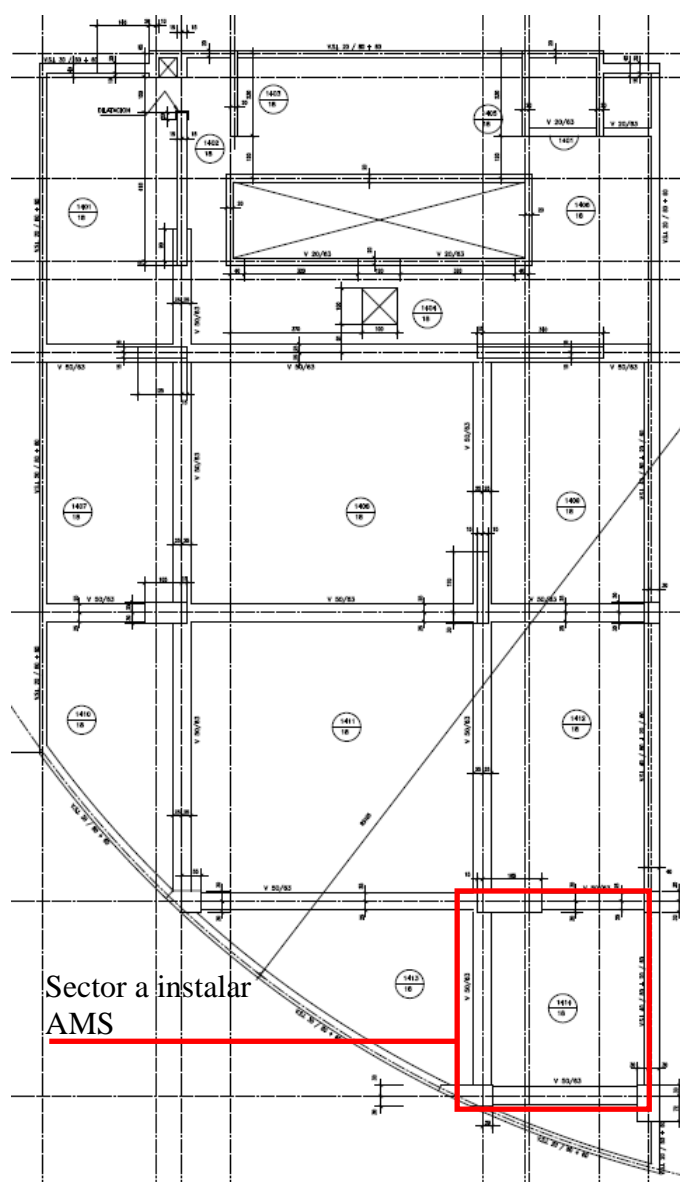


Figura V-11: Ubicación en planta AMS. Elevación 48.05m (azotea)

La losa bajo el sector del AMS fue reforzada con elementos de acero y aumento de altura de las vigas de apoyo, según el siguiente esquema:

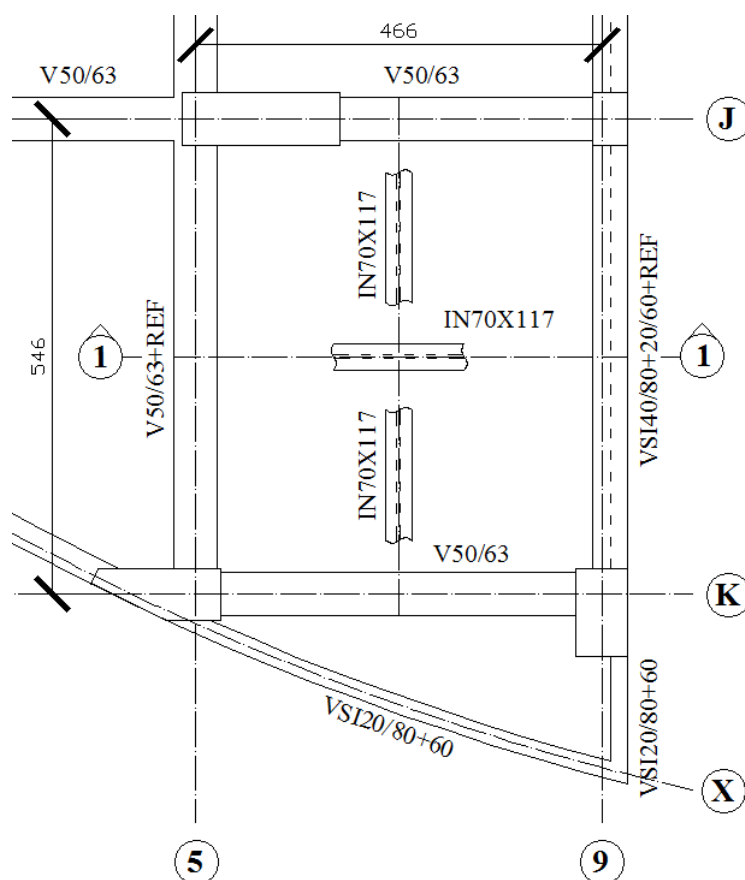


Figura V-12: refuerzo de losa de azotea en sector donde se ha dispuesto del AMS.

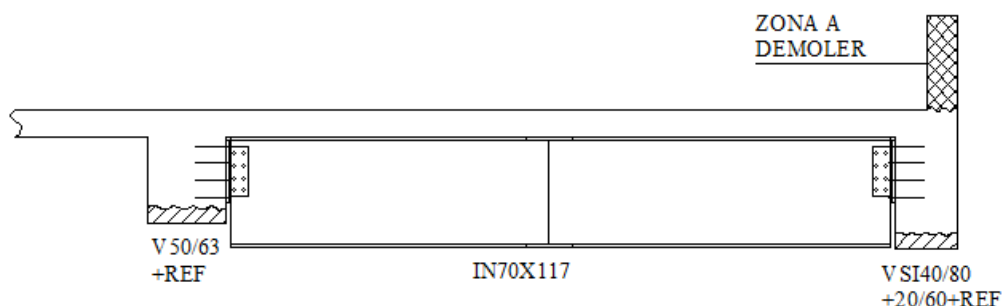


Figura V-13: corte 1-1

## b) Dimensiones AMS.

Para el diseño del AMS se ha seleccionado un sistema consistente de una estructura rígida que descansa sobre aisladores elásticos. La estructura rígida está formada por una caja de hormigón que contiene esferas de acero de diámetro 25cm, que descansa sobre vigas de 40x100cm las que, a su vez, descansan sobre los aisladores elásticos.

De acuerdo a la masa requerida, la dimensión en planta seleccionada y a la disposición de los puntos de apoyo, las dimensiones se determinaron según la siguiente tabla:

Tabla V-18: datos iniciales para determinación de propiedades del AMS.

$M_T$	1606	tonf*s <sup>2</sup> /m	masa total del edificio.
$\mu_m$	3%		razón de masa AMS/Edificio.
$M_{AMS}$	48.19	tonf*s <sup>2</sup> /m	masa AMS.
$P_{AMS}$	472.22	tonf	peso AMS.
$\gamma_s$	7.85	tonf/m <sup>3</sup>	peso unitario acero.
$\gamma_H$	2.50	tonf/m <sup>3</sup>	peso unitario hormigón.



Tabla V-19: dimensiones del cajón.

B	6.00	m	dimensión en X.
L	6.75	m	dimensión en Y.
H	1.80	m	altura.
$e_M$	0.20	m	espesor de muros.
$e_L$	0.30	m	espesor de losa.
$V_C$	19.56	$m^3$	volumen de hormigón.
$P_C$	48.9	tonf	peso.
$M_C$	4.99	tonf*s <sup>2</sup> /m	masa.
$C_{M\_ZC}$	0.49	m	centro de gravedad en Z.

Tabla V-20: esferas de acero.

D	0.25	m	diámetro esfera.
V	0.01	$m^3$	volumen por esfera.
Espacio	53.34	$m^3$	espacio disponible.
n	6519		total de esferas.
$V_E$	53.33	$m^3$	volumen total de esferas.
$P_E$	418.67	tonf	peso.
$M_E$	42.72	tonf*s <sup>2</sup> /m	masa.
$C_{M\_ZE}$	1.05	m	centro de gravedad en Z.

Tabla V-21: dimensiones del AMS.

B	0.3	m	ancho de la viga.
H	0.8	m	altura de la viga.
$L_X$	6.75	m	longitud de la viga en X.
$L_Y$	6	m	longitud de la viga en Y.
$V_V$	7.65	$m^3$	volumen de hormigón de vigas.
$P_V$	19.13	ton	peso total vigas.
$M_V$	1.95	$\text{tonf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$	masa total vigas.
$C_{M\_ZV}$	0.25	m	centro de masa vigas.

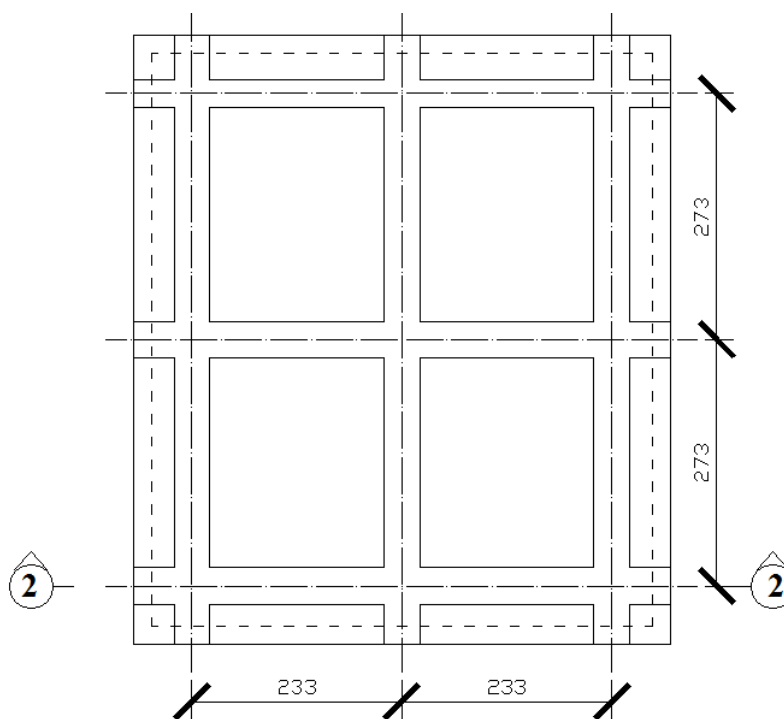


Figura V-14: planta AMS

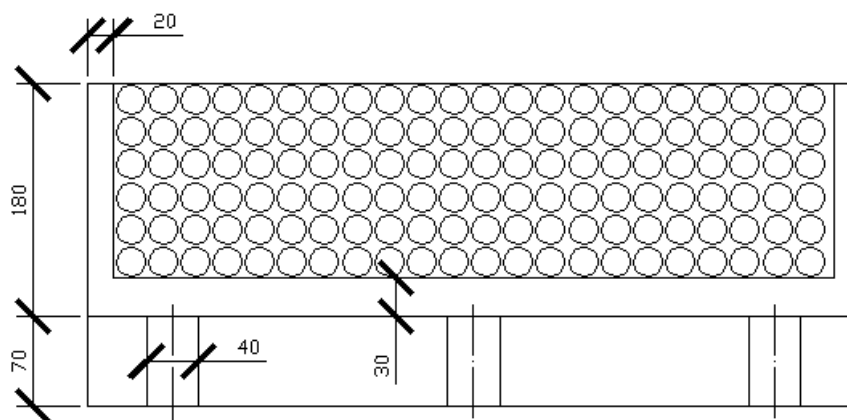


Figura V-15: corte 2-2 AMS

## c) Propiedades aisladores elastoméricos.

Se ha considerado utilizar un solo tipo de aislador elastomérico, sin embargo los requerimientos de rigidez y amortiguamiento son distintas para cada dirección de análisis. Por lo anterior, se ha considerado que no todos los aisladores trabajan en conjunto en ambas direcciones, sino que en una de las direcciones (en “X”) la conexión con la losa es una conexión deslizante:

Tabla V-22: propiedades horizontales de aisladores elastoméricos del AMS.

	$k_{HAMS}$ tonf/m	$c_{AMS}$ tonf*s/m	$n_{aisladores}$	$k_{Hi}$ tonf/m	$c_i$ tonf*s/m	$k_{Hf}$ tonf/m	$c_f$ tonf*s/m
En X	1123.10	23.26	4	280.78	5.82	277.96	5.48
En Y	1375.73	25.75	5	275.15	5.15		

Para efectos de obtener fuerzas axiales de diseño de los aisladores, se ha supuesto que el sistema de aislación posee la frecuencia vertical mínima indicada en la NCh2745.Of2003 (ref 6) es decir 10 Hz. Según esto, se tiene:

$M_{AMS} = 48,19$  tonf (de la tabla V-13)

$f_{v\text{mín}} = 10$  Hz

Dado que:

$$f_{AMS} = \frac{\omega_{AMS}}{2\pi} = \frac{\sqrt{K_{AMS}/M_{AMS}}}{2\pi} \rightarrow K_{AMS} = (2\pi f)^2 M_{AMS}$$

Se tiene que:

$K_{VAMS} = 190.230$  tonf/m

Para efectos de prediseño, se utilizará  $K_{VAMS} = 200.000$  tonf/m

Lo anterior implica que, para cada aislador elastomérico, la rigidez vertical será:

$K_{vi} = K_{VAMS} / 5 = 40.000$  tonf/m.

La disposición de los aisladores se presenta en la siguiente figura:

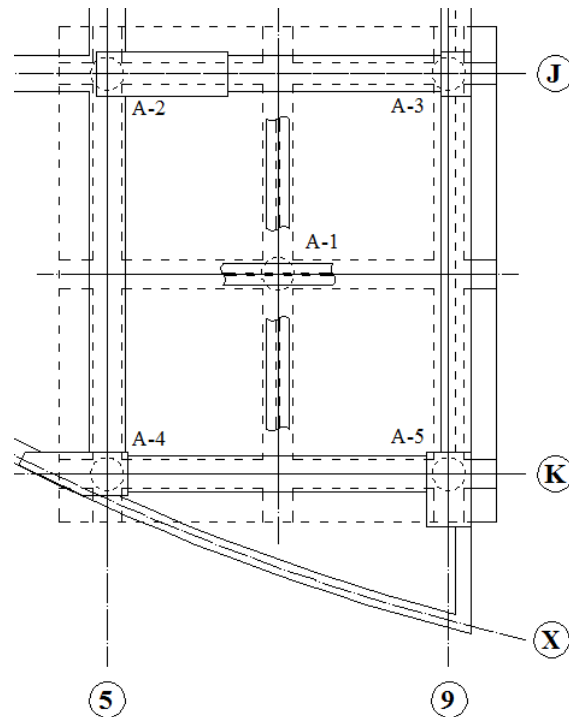


Figura V-16: disposición de los aisladores en el AMS. A-1 posee una conexión deslizante en la dirección X.

Lo anterior ha sido implementado en el modelo AMS3 de la siguiente forma:

Link/Support Type: Linear

Property Name: 2-DIRECCION

Property Notes: Modity/Show...

Total Mass and Weight:

Mass	0.	Rotational Inertia 1	0.
Weight	0.	Rotational Inertia 2	0.
		Rotational Inertia 3	0.

Factors For Line, Area and Solid Springs:

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties:

Direction	Fixed	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P-Delta Parameters: Advanced...

Shear Distance from End J:

U2	0.
U3	0.

Units: Tonl. m. C

Stiffness Values Used For All Load Cases:

U1	U2	U3	R1	R2	R3
40000.	277.96	277.96			

Damping Values Used For All Load Cases:

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0.	5.48	5.48			

OK Cancel

Figura V-17: definición de los aisladores elastoméricos A-2 a A-4 en el modelo AMS3.

Link/Support Type: Linear

Property Name: 1-DIRECCION

Property Notes: Modity/Show...

Total Mass and Weight:

Mass	0.	Rotational Inertia 1	0.
Weight	0.	Rotational Inertia 2	0.
		Rotational Inertia 3	0.

Factors For Line, Area and Solid Springs:

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties:

Direction	Fixed	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

P-Delta Parameters: Advanced...

Shear Distance from End J:

U2	0.
U3	

Units: Tonl. m. C

Stiffness Values Used For All Load Cases:

U1	U2	U3	R1	R2	R3
40000.	277.96				

Damping Values Used For All Load Cases:

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0.	5.48				

OK Cancel

Figura V-18: definición del aislador elastomérico A-1 en el modelo AMS3.

**V.2.5. Determinación de la respuesta de la estructura y del AMS, considerando aisladores elastoméricos.**

Se verifica, en forma indirecta, la reducción en la respuesta torsional de la estructura a través de la reducción de los desplazamientos totales en los vértices de la planta de azotea. Esto se presenta en la siguiente tabla:

Tabla V-23: Máximos desplazamientos totales para edificio con AMS.

Ubicación nodo	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
SP	15.03	14.54	13.65	14.12	10.23	13.46
NP	21.64	16.57	16.77	19.09	17.64	16.70
NO	23.41	16.49	16.15	19.57	18.06	19.37
SO	20.38	14.54	16.09	19.13	15.79	19.51

Tabla V-24: reducción de los máximos desplazamientos totales de edificio.

Ubicación nodo	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
SP	42.26	35.63	29.14	39.20	36.43	23.78
NP	19.10	37.68	49.02	33.21	31.54	20.26
NO	21.45	14.51	46.62	22.20	31.77	17.22
SO	32.91	28.47	29.02	12.65	29.41	16.42
Promedio	28.93	29.07	38.45	26.81	32.29	19.42

El AMS presenta los siguientes desplazamientos en su interfase (en los aisladores) considerando  $R=1$  y sismo máximo posible:

Tabla V-25: desplazamiento total de diseño AMS

Aislador	Desplazamiento total de diseño (cm)					
	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
A-1	93.45	75.87	71.04	76.31	70.95	60.34
A-2	93.42	75.61	70.63	76.02	70.70	62.09
A-3	87.98	75.94	71.36	73.48	70.89	65.62
A-4	99.21	75.64	70.70	79.55	71.94	61.78
A-5	93.68	76.92	72.91	76.61	71.02	63.96

Tabla V-26: desplazamiento total máximo AMS

Aislador	Desplazamiento total máximo (cm)					
	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
A-1	112.14	91.04	85.25	91.57	85.14	72.41
A-2	112.11	90.73	84.75	91.22	84.84	74.51
A-3	105.58	91.12	85.64	88.18	85.06	78.74
A-4	119.05	90.76	84.84	95.46	86.33	74.14
A-5	112.42	92.31	87.49	91.93	85.22	76.75

Para el diseño de los aisladores, de acuerdo a las disposiciones de la NCh2745.Of2003, punto 10.2.6, se requiere verificar su estabilidad para cargas verticales para las combinaciones de carga siguientes:

$$1.2DL + 1.0L + |E|_{max} \quad (5.3)$$

$$0.8DL - |E|_{min} \quad (5.4)$$

La estabilidad se debe verificar considerando el desplazamiento en el aislador igual al máximo desplazamiento total (entregadas en la tabla anterior) y  $|E|_{max}$  y  $|E|_{min}$  corresponden a las respuestas extremas debida al movimiento sísmico máximo, que se entregan en la tabla a continuación:

Tabla V-27: magnitudes de carga axial por aislador (parte 1)

Aislador	Combo	Sismo	N tonf
A-1	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-1	-124.6506
	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-2	-123.2228
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-1	-125.5995
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-2	-123.329
	1.2D+L+E1	Viña 1985-1	-117.0209
	1.2D+L+E1	Viña 1985-2	-117.7664
	0.8D+E1	Llolleo 2010-1	-55.1517
	0.8D+E1	Llolleo 2010-2	-55.2507
	0.8D+E1	Llolleo 1985-1	-54.6728
	0.8D+E1	Llolleo 1985-2	-56.5971
	0.8D+E1	Viña 1985-1	-61.2492
	0.8D+E1	Viña 1985-2	-59.0324
A-2	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-1	-343.7588
	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-2	-356.128
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-1	-269.3894
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-2	-296.2427
	1.2D+L+E1	Viña 1985-1	-331.3754
	1.2D+L+E1	Viña 1985-2	-280.0597
	0.8D+E1	Llolleo 2010-1	210.7037
	0.8D+E1	Llolleo 2010-2	152.8744
	0.8D+E1	Llolleo 1985-1	84.2574
	0.8D+E1	Llolleo 1985-2	78.0555
	0.8D+E1	Viña 1985-1	147.2937
	0.8D+E1	Viña 1985-2	93.1712



Tabla V-27: magnitudes de carga axial por aislador (parte 2)

Aislador	Combo	Sismo	N tonf
A-3	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-1	-259.4577
	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-2	-265.8352
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-1	-296.8958
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-2	-278.2402
	1.2D+L+E1	Viña 1985-1	-228.7568
	1.2D+L+E1	Viña 1985-2	-270.0473
	0.8D+E1	Llolleo 2010-1	84.6187
	0.8D+E1	Llolleo 2010-2	73.2292
	0.8D+E1	Llolleo 1985-1	117.8468
	0.8D+E1	Llolleo 1985-2	116.133
	0.8D+E1	Viña 1985-1	37.2284
	0.8D+E1	Viña 1985-2	88.1161
A-4	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-1	-286.9974
	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-2	-267.5752
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-1	-304.7121
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-2	-307.8917
	1.2D+L+E1	Viña 1985-1	-233.4561
	1.2D+L+E1	Viña 1985-2	-285.9914
	0.8D+E1	Llolleo 2010-1	88.594
	0.8D+E1	Llolleo 2010-2	102.722
	0.8D+E1	Llolleo 1985-1	124.2101
	0.8D+E1	Llolleo 1985-2	113.0887
	0.8D+E1	Viña 1985-1	62.579
	0.8D+E1	Viña 1985-2	102.0762
A-5	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-1	-416.9637
	1.2D+L+E1	Llolleo 2010-2	-348.3729
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-1	-276.0146
	1.2D+L+E1	Llolleo 1985-2	-267.9989
	1.2D+L+E1	Viña 1985-1	-351.432
	1.2D+L+E1	Viña 1985-2	-279.0446
	0.8D+E1	Llolleo 2010-1	161.4511
	0.8D+E1	Llolleo 2010-2	180.505
	0.8D+E1	Llolleo 1985-1	85.0446
	0.8D+E1	Llolleo 1985-2	118.4254
	0.8D+E1	Viña 1985-1	163.4906
	0.8D+E1	Viña 1985-2	107.2729

Tabla V-28: carga muerta axial sobre aisladores

Aislador	DL tonf
A-1	-88.90
A-2	-96.27
A-3	-93.87
A-4	-93.87
A-5	-96.27

En el anexo A, se presenta el diseño para el aislador más desfavorable (A-5). Según dicho diseño, las dimensiones finales de los aisladores elastoméricos del AMS son:

$H_r = 45$  cm, altura de la goma del aislador.

$H = 58$  cm, altura total del aislador.

$D = 135$  cm, diámetro del aislador.

$n_r = 47$ , cantidad de capas de goma del aislador.

$t_r = 1.00$  cm, espesor de cada capa de goma del aislador.

$t_s = 0.30$  cm, espesor de placas intermedias de acero del aislador.

Las dimensiones del aislador lo hacen muy difícil de implementar, por lo que se hace necesario contemplar otra solución, como por ejemplo complementar su trabajo con el uso de deslizadores, lo que se procede a presentar a continuación.

### V.3. Edificio con AMS compuesto por aisladores elastoméricos y deslizadores.

#### V.3.1. Determinación de las propiedades del AMS, modelo final.

Este AMS está compuesto por aisladores elastoméricos que se encuentran dilatados para cargas gravitacionales, por lo que sólo forman parte del sistema de restitución lateral. Caso aparte es el del aislador A-5 que, tal como en el caso del aislador A-1 del modelo AMS3, posee una conexión deslizante en la dirección X. El trabajo de los aisladores se ha complementado con la disposición de deslizadores friccionales, que son los elementos que resisten las cargas gravitacionales. La distribución de aisladores y deslizadores se muestra en la figura a continuación:

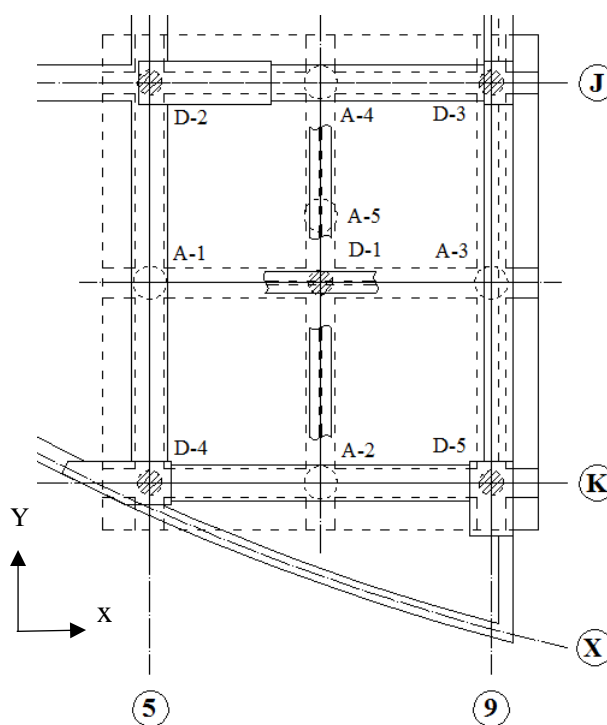


Figura V-19: disposición de los aisladores y deslizadores en el modelo AMS4. A-5 posee una conexión deslizante en la dirección X

Para la realización del prediseño del AMS, se ha mantenido el aislador diseñado en el punto V.2.4 y se ha seleccionado las propiedades para los deslizadores indicadas en el siguiente procedimiento.

La expresión de Constantinou (de la Llera J.C. y Almazán J.L. (2003)), define el coeficiente de fricción del disipador:

$$\bar{\mu}(\bar{v}) = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min})e^{-a_f \bar{v}} \quad (5.4)$$

En dicha expresión se tiene:

$\bar{v}$ : velocidad de deformación en aislador.

$\mu_{max}$ : coeficiente de fricción para velocidad máxima.

$\mu_{min}$ : coeficiente de fricción para velocidad mínima.

$a_f$ : coeficiente

Considerando como material de la superficie Teflón 15GF, las propiedades anteriores toman los siguientes valores:

$\mu_{max}$ : 10.08%.

$\mu_{max} - \mu_{min}$ : 5.80%.

$a_f$ : 0.55 s/in

Los deslizadores friccionales han sido implementados en el modelo AMS4 de la siguiente forma:

The image displays a software interface for defining a frictional slider. The main window is titled 'Link/Support Type' and is set to 'Friction Isolator'. The 'Property Name' is 'FRICCION'. Below this, there are sections for 'Total Mass and Weight', 'Factors For Line, Area and Solid Springs', and 'Directional Properties'. The 'Directional Properties' section includes a table with columns for 'Direction', 'Fixed', 'NonLinear', and 'Properties'. The 'U1', 'U2', and 'U3' directions are checked under 'Fixed' and 'NonLinear'. Below this table are 'Fix All' and 'Clear All' buttons. To the right of the 'Directional Properties' section is a 'P-Delta Parameters' section with an 'Advanced...' button. At the bottom right are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Below the main window are three sub-dialogs, each for a different direction: U1, U2, and U3. Each sub-dialog has an 'Identification' section with 'Property Name' (FRICCION), 'Direction' (U1, U2, or U3), 'Type' (Friction Isolator), and 'NonLinear' (Yes). Below this is a 'Properties Used For Linear Analysis Cases' section with 'Effective Stiffness' and 'Effective Damping' fields. Below that is a 'Properties Used For Nonlinear Analysis Cases' section with 'Stiffness', 'Damping Coefficient', 'Friction Coefficient, Slow', 'Friction Coefficient, Fast', 'Rate Parameter', and 'Radius of Sliding Surface' fields. Each sub-dialog has 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U1..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U2..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U3..."/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R1..."/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R2..."/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R3..."/>

Direction	Effective Stiffness	Effective Damping	Stiffness	Damping Coefficient	Friction Coefficient, Slow	Friction Coefficient, Fast	Rate Parameter	Radius of Sliding Surface
U1	4000.	0.	4000.	0.				
U2	0.	0.	400.	0.	0.0428	0.1008	0.22	10000.
U3	0.	0.	400.	0.	0.0428	0.1008	0.22	10000.

Figura V-20: definición de deslizador friccional D-1 a D5 en el modelo AMS4.

**V.3.2. Determinación de la respuesta de la estructura y del AMS, considerando aisladores de goma y deslizadores friccionales.**

Se verifica, en forma indirecta, la reducción en la respuesta torsional de la estructura a través de la reducción de los desplazamientos totales en los vértices de la planta de azotea. Esto se presenta en la siguiente tabla:

Tabla V-29: Máximos desplazamientos totales para edificio con AMS.

Ubicación nodo	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
SP	14.92	14.54	13.65	14.12	10.23	13.46
NP	20.98	16.57	16.77	19.09	17.64	16.70
NO	22.76	16.49	16.15	19.57	18.06	19.37
SO	20.33	14.54	16.09	19.13	15.79	19.51

Tabla V-30: reducción en los máximos desplazamientos totales de edificio.

Ubicación nodo	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
SP	42.68	35.63	29.14	39.20	36.43	23.78
NP	21.56	37.68	49.02	33.21	31.54	20.26
NO	23.63	14.51	46.62	22.20	31.77	17.22
SO	33.08	28.47	29.02	12.65	29.41	16.42
Promedio	30.24	29.07	38.45	26.81	32.29	19.42

Dado que los aisladores elastoméricos ya no resisten carga axial, su diseño solo está determinado por las deformaciones por corte. Según esto, se presenta los siguientes

desplazamientos en la interfase del AMS (en los aisladores) considerando  $R=1$  y sismo máximo posible:

Tabla V-31: desplazamiento total de diseño AMS.

Deslizador / Aislador	Desplazamiento total de diseño (cm)					
	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
D-1	80.31	60.25	63.20	64.91	65.09	55.00
D-2	80.81	58.54	57.08	63.23	63.94	64.19
D-3	70.42	62.20	66.50	72.66	58.78	50.74
D-4	93.17	60.33	62.16	76.60	77.91	68.69
D-5	81.68	71.30	72.31	81.33	68.60	52.39
A-1	81.68	71.30	58.17	69.30	70.21	64.56
A-2	86.28	58.24	66.59	72.26	72.87	59.19
A-3	87.12	65.58	68.97	75.07	60.07	50.38
A-4	74.21	66.21	60.65	61.74	58.29	54.92
A-5	73.97	56.51	61.92	62.89	62.39	54.62

Tabla V-32: desplazamiento total máximo AMS.

Deslizador / Aislador	Desplazamiento total máximo (cm)					
	Llolleo 2010 -1	Llolleo 2010 -2	Llolleo 1985 -1	Llolleo 1985 - 2	Viña 1985 -1	Viña 1985 - 2
D-1	96.38	72.30	75.83	77.90	78.11	66.00
D-2	96.97	70.25	68.50	75.88	76.73	77.02
D-3	84.51	74.65	79.80	87.20	70.54	60.89
D-4	111.80	72.40	74.60	91.92	93.49	82.43
D-5	98.02	85.56	86.77	97.59	82.32	62.87
A-1	98.02	85.56	69.80	83.15	84.25	77.47
A-2	103.54	69.89	79.91	86.71	87.44	71.03
A-3	104.55	78.70	82.76	90.09	72.08	60.45
A-4	89.05	79.46	72.78	74.09	69.95	65.91
A-5	88.76	67.81	74.30	75.47	74.87	65.54

Como se indicó anteriormente, bajo este esquema se simplifica el proceso de diseño de los aisladores, vale decir por no resistir cargas gravitacionales. En el anexo B, se presenta el diseño para el aislador más desfavorable (A-3). Según éste, las dimensiones finales de los aisladores elastoméricos del AMS son:

$H_r = 34$  cm, altura de la goma del aislador.

$H = 44$  cm, altura total del aislador.

$D = 115$  cm, diámetro del aislador.

$n_r = 35$ , cantidad de capas de goma del aislador.

$t_r = 1.00$  cm, espesor de cada capa de goma del aislador.

$t_s = 0.30$  cm, espesor de placas intermedias de acero del aislador.

Acerca del diseño del deslizador, al considerar el material de la superficie de Teflón 15GF, se tiene que la presión admisible es 2000psi. Con esto, la presión que ejerce el núcleo del aislador no puede superar la presión admisible. Las fuerzas axiales que transmite el deslizador a su base se presentan en la siguiente tabla:



Tabla V-33: magnitudes de carga axial por deslizador (parte 1)

Deslizador	Sismo	N tonf
D-1	Llolleo2010-1	-108.01
	Llolleo2010-2	-109.34
	Llolleo1985-1	-111.11
	Llolleo1985-2	-108.61
	Vina1985-1	-103.11
	Vina1985-2	-101.13
D-2	Llolleo2010-1	-278.30
	Llolleo2010-2	-234.55
	Llolleo1985-1	-222.49
	Llolleo1985-2	-288.26
	Vina1985-1	-287.05
	Vina1985-2	-244.04
D-3	Llolleo2010-1	-219.18
	Llolleo2010-2	-238.82
	Llolleo1985-1	-259.38
	Llolleo1985-2	-257.08
	Vina1985-1	-186.97
	Vina1985-2	-221.21
D-4	Llolleo2010-1	-250.98
	Llolleo2010-2	-277.84
	Llolleo1985-1	-267.18
	Llolleo1985-2	-291.50
	Vina1985-1	-190.99
	Vina1985-2	-235.42

Tabla V-34: magnitudes de carga axial por deslizador (parte 2)

Deslizador	Sismo	N tonf
D-5	Llolleo2010-1	-356.19
	Llolleo2010-2	-217.05
	Llolleo1985-1	-249.94
	Llolleo1985-2	-279.09
	Vina1985-1	-303.35
	Vina1985-2	-245.31

Las cargas entregadas en la tabla anterior implican que el deslizador debe tener las siguientes dimensiones:

Para aislador D-5:

Presión a corto plazo: 305 t

Presión admisible: 2000 psi = 0.141 tonf/cm<sup>2</sup>

Área requerida de núcleo de deslizador: 305/0.141 = 2169 cm<sup>2</sup>

Diámetro núcleo:  $\sqrt{2169 * 4/\pi} = 52.55$  cm

Desplazamiento total máximo: 98.02 cm para deslizador D-5

Diámetro total deslizador: 52.55+2\*98.02 = 248cm

**V.4.Desplazamientos totales máximos por piso y desviación estándar máxima de los desplazamientos por piso para el edificio con ambos tipos de AMS.**

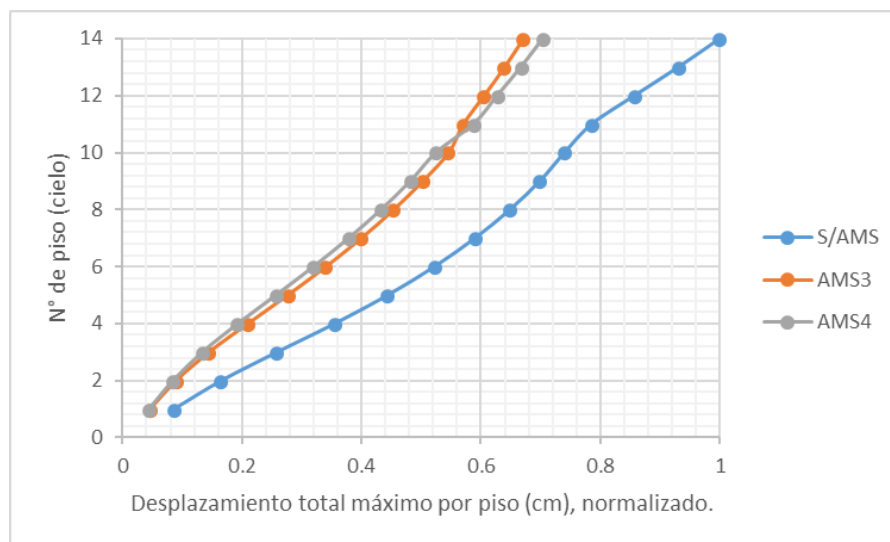


Figura V-21: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Llolleo 2010-1.

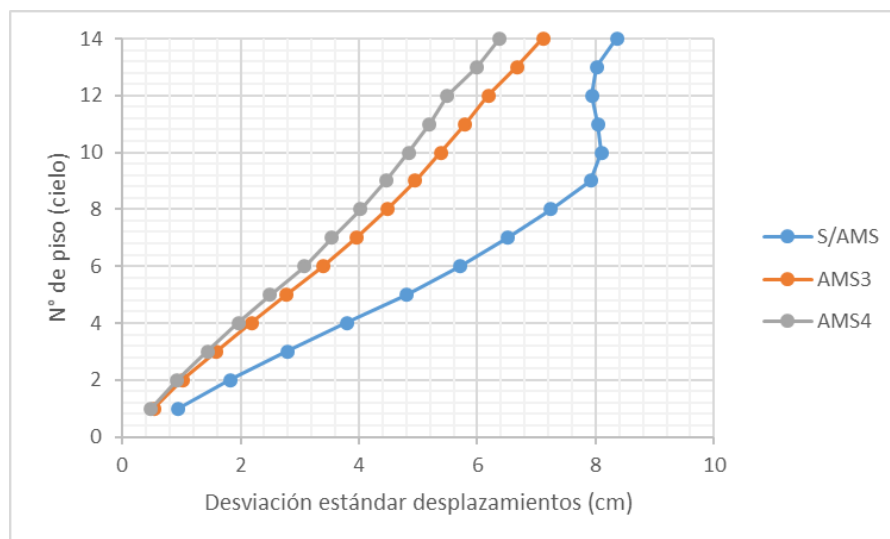


Figura V-22: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Llolleo 2010-1

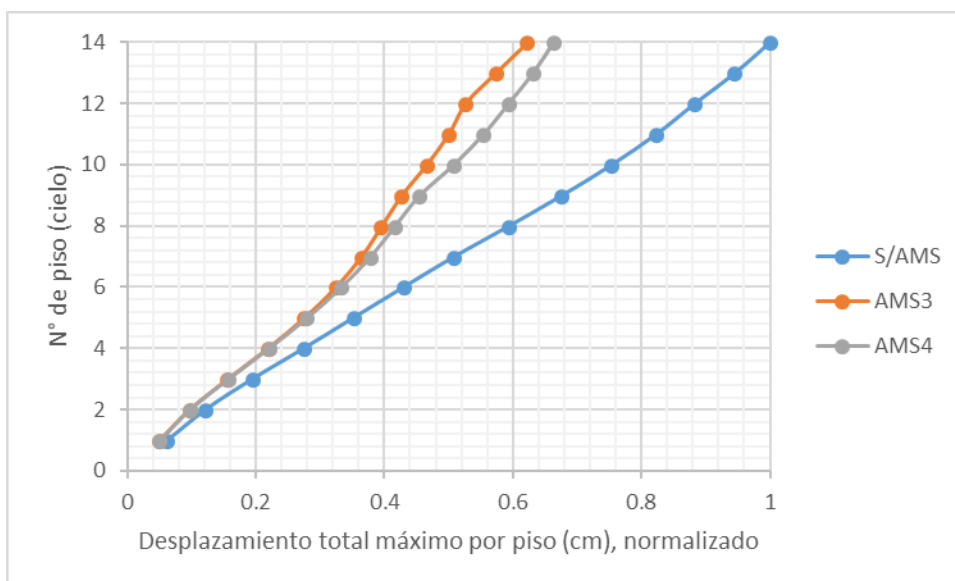


Figura V-23: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga. Lollole 2010-2.

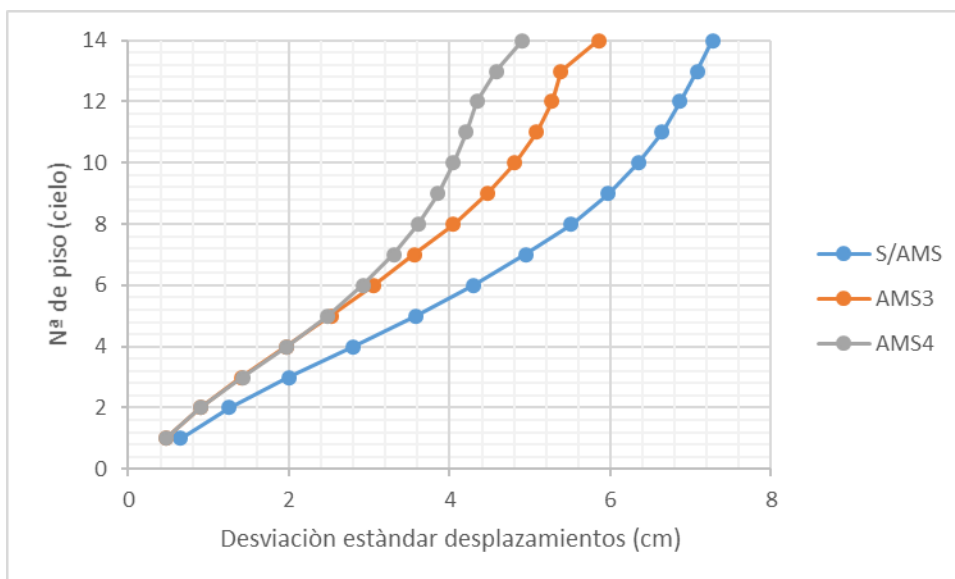


Figura V-24: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4 para el caso de carga. Lollole 2010-2.

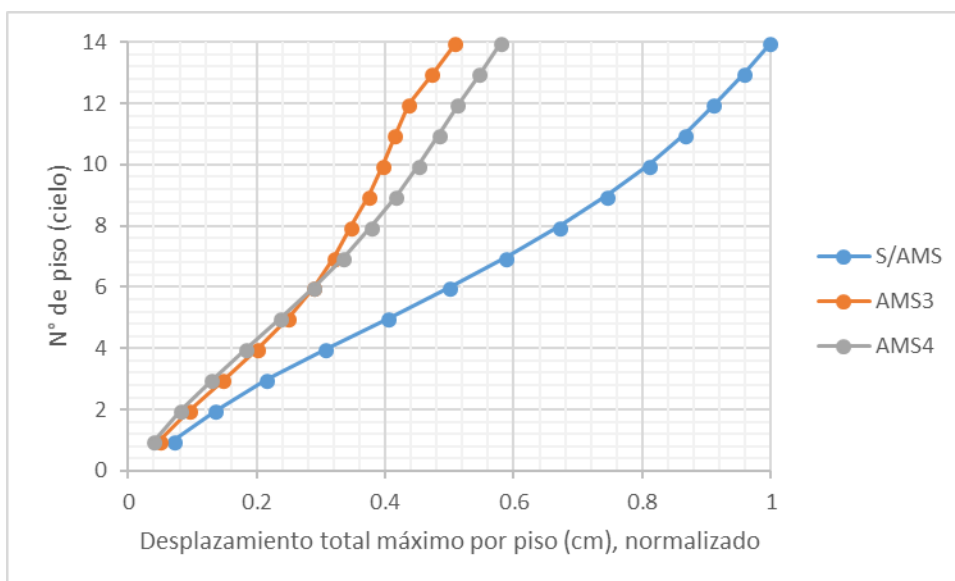


Figura V-25: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole1985-1.

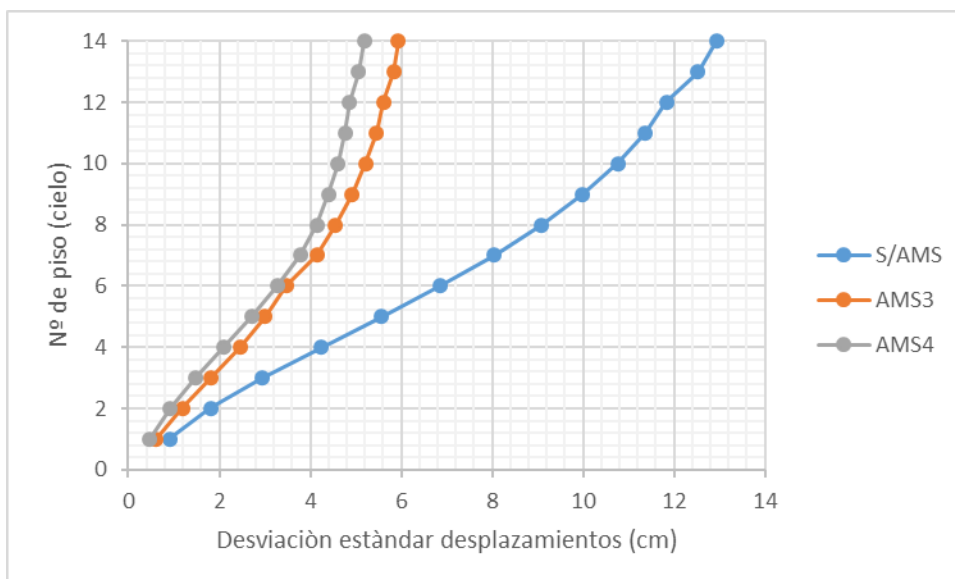


Figura V-26: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole1985-1.

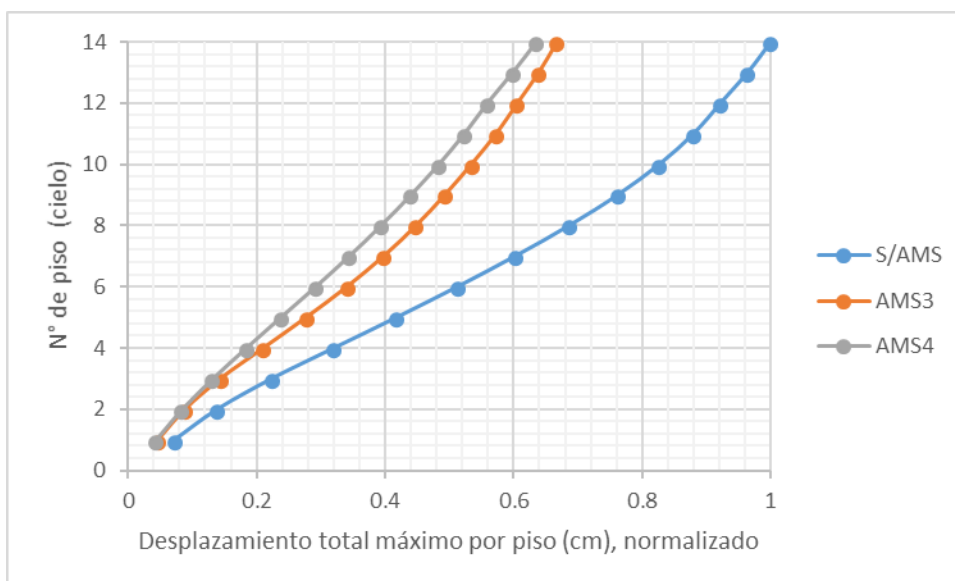


Figura V-27: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole1985-2.

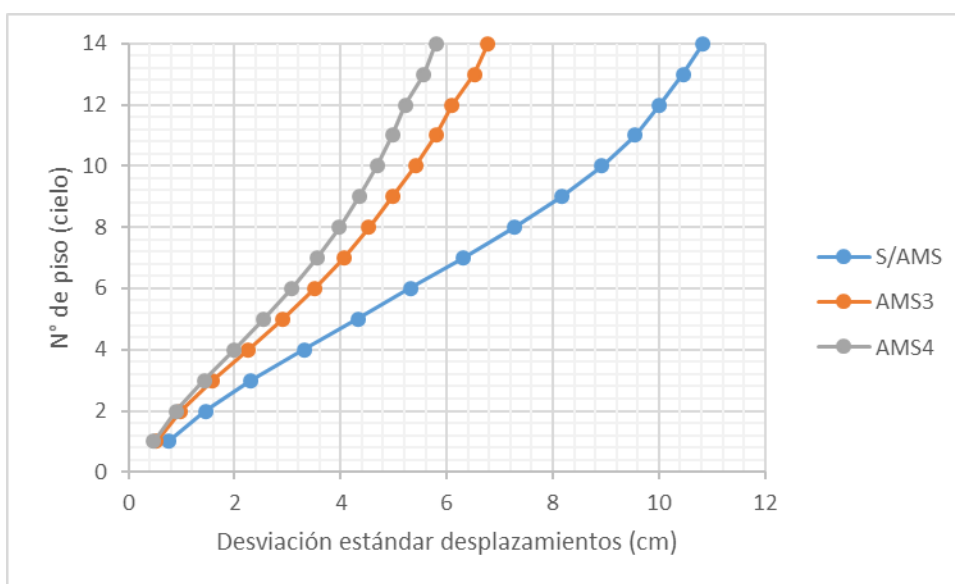


Figura V-28: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Lollole1985-2.

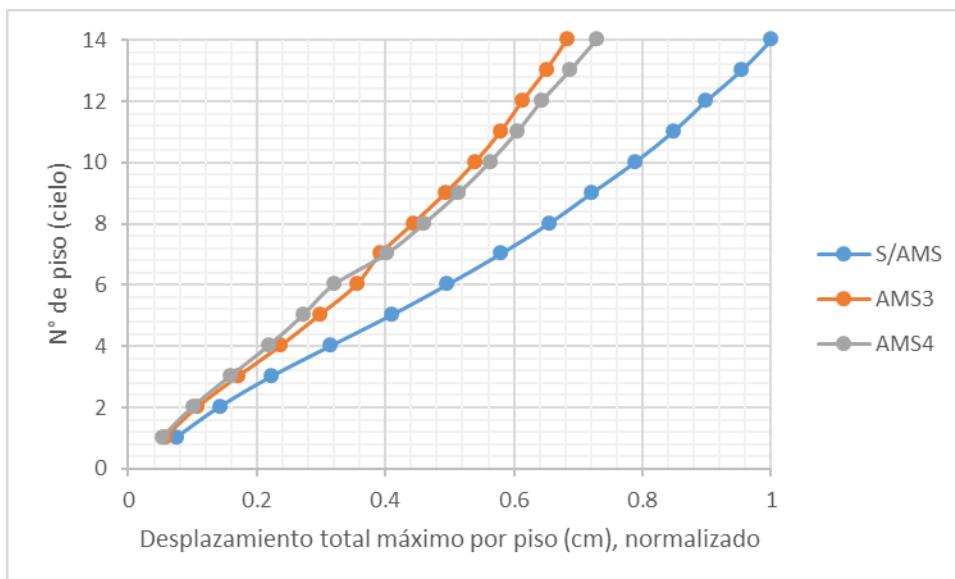


Figura V-29: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Viña1985-1.

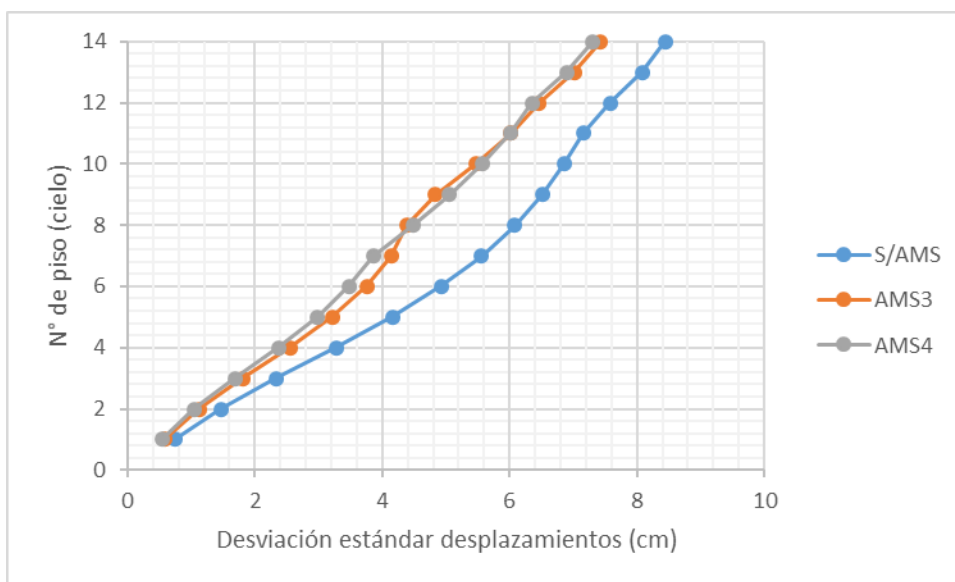


Figura V-30: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Viña1985-1.

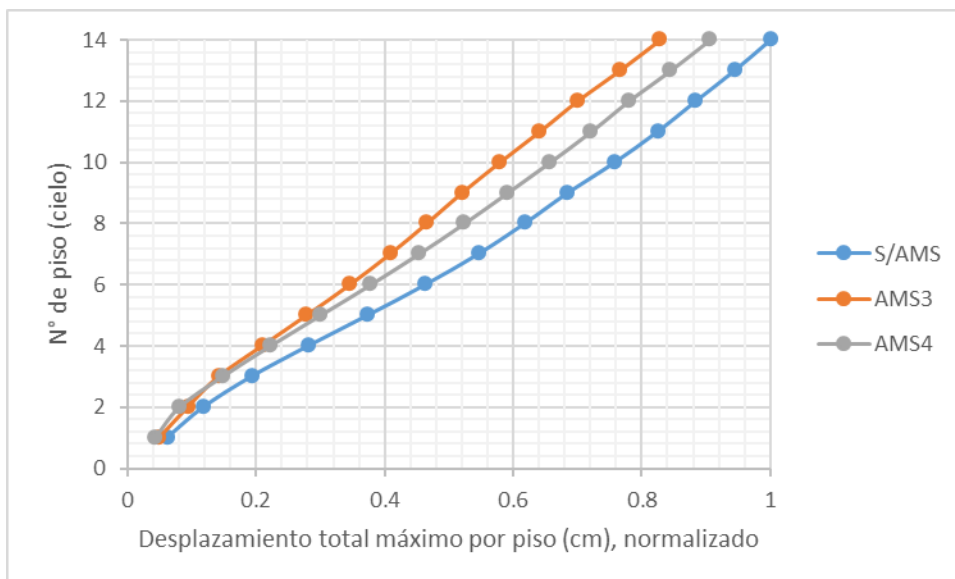


Figura V-31: desplazamiento total máximo por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Viña1985-2.

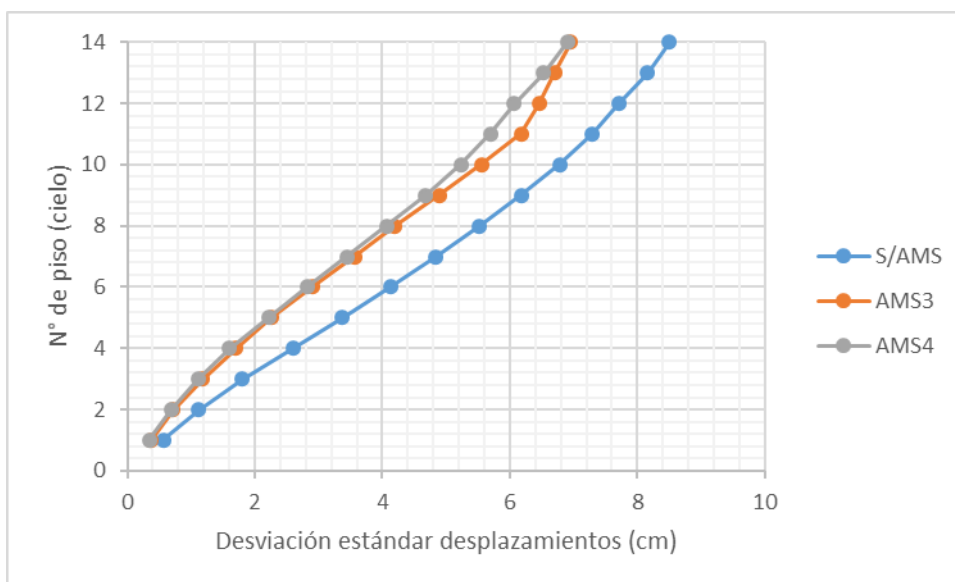


Figura V-32: desviación estándar máxima por piso para los modelos del edificio original (S/AMS), AMS3 y AMS4, caso de carga Viña1985-2.



## VI. CONCLUSIONES.

Las conclusiones que se entregan a continuación sólo son válidas para el caso en estudio, vale decir, el análisis del edificio Santiago Norte.

En el análisis de todos los casos de carga, al incorporar el AMS ubicándolo en las cercanías del vértice dónde se produjeron mayores desplazamientos para el edificio original (sin AMS), se produjeron reducciones de los desplazamientos totales máximos por piso acompañados por reducciones en la desviación estándar máxima de los desplazamientos de piso (que implica reducción en la respuesta torsional). Esto concuerda con las conclusiones de Almazán et al (2012) del balance torsional

La utilización de amortiguadores de masa sintonizada es adecuada para controlar la respuesta torsional de estructuras asimétricas que ya están construidas, pero es necesario considerar que el ingreso de estos dispositivos implica la realización de modificaciones (refuerzos) locales a la estructura principal que pueden implicar alteraciones en su funcionamiento.

Si bien para todos los análisis de la estructura con AMS se produjeron reducciones de la respuesta respecto a la estructura original, en los casos de carga “Viña 1985-1” y “Viña 1985-2” esas reducciones fueron bastante menores en los niveles superiores de la estructura (alrededor del 2%) lo que implica que la eficiencia del AMS depende del contenido de frecuencias de la sollicitación.

La incorporación de deslizadores friccionales no presentó una variación significativa para la respuesta del AMS ni para la estructura.

Los aisladores y deslizadores friccionales obtenidos durante la etapa de diseño resultan de dimensiones que los hace difíciles de implementar, existiendo vías de optimización a evaluar tales como modificar la masa traslacional del AMS, modificar las dimensiones del mismo, etc, debiendo evaluarse su efecto sobre la respuesta de la estructura.

## BIBLIOGRAFIA

ALMAZÁN, J.L. y DE LA LLERA, J.C. (2003) An experimental study of nominally symmetric and asymmetric structures isolated with FPS. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Volumen n°32, páginas 891 a 918.

ALMAZÁN, J.L, ESPINOZA, G. y AGUIRRE, J.J. (2012) Torsional balance of asymmetric structures by means of tuned mass dampers. *Engineering Structures*. Volumen n°42, páginas 308 a 328.

DE LA LLERA, J.C. (2011). Apuntes de clases curso IEG3530 Disipación de Energía. Magíster en Ingeniería Estructural y Geotecnia, Pontificia Universidad Católica de Chile.

DE LA LLERA, J.C. (2011). Apuntes de clases curso IEG3520 Aislación Sísmica. Magíster en Ingeniería Estructural y Geotecnia, *Pontificia Universidad Católica de Chile*.

Rozas, L. (2009). Reducción de la Respuesta Estructural por Medio del Uso de Disipadores de Masa Sintonizada y Disipadores de Columna Líquida Sintonizada. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Chile*.

NCh2745.Of2003 (2003). Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. Instituto Nacional de Normalización.

KELLY, J.M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*. John Wiley and Sons, New York.

SOONG, T.T. y DARGUSH, G.F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley and Sons, New York.

## ANEXOS

### Anexo A: DISEÑO AISLADOR a-5 SEGÚN DISPOSICIONES DE LA NCh2745.OF2003

Propiedades goma de aisladores elastoméricos.

G	<b>8</b>	kg/cm <sup>2</sup>
K	<b>20000</b>	kg/cm <sup>2</sup>
v	<b>0.4997</b>	
Eo	24	kg/cm <sup>2</sup>

Suelo	<b>III</b>
Zona sísmica	<b>2</b>

Desplazamiento de diseño.

$\beta_D$	<b>5</b>	%	
Z	1		
CD	330	mm	
BD	1.00		
DD	330	mm	desplazamiento de diseño.
DTD	387	mm	desplazamiento total de diseño.
DTD'	348	mm	desplazamiento total de diseño capítulo 8 NCh2745.Of2003
DTD_calc	<b>937</b>	mm	desplazamiento total de diseño obtenido de modelación.

Desplazamiento máximo.

$\beta_M$	<b>5</b>	%	
MM	1.2		
Z	1		
CM	396	mm	
BM	1.00		
DM	396	mm	desplazamiento máximo.
DTM	465	mm	desplazamiento total máximo.
DTM'	418	mm	desplazamiento total máximo capítulo 8 NCh2745.Of2003
DTM_calc	<b>1124</b>	mm	desplazamiento total de máximo obtenido de modelación.

Fuerza lateral mínima en el sistema de aislación.

kDmáx	<b>278</b>	t/m	
	2.72	kN/mm	
Vb	899	kN	fuerza de corte de diseño de sistema de aislación.
Vb'	809	kN	fuerza de corte de diseño de sistema de aislación, capítulo 8.
	83	t	

Dimensionamiento de aisladores circulares

$\gamma$	2.21		
Geff	9.02	kg/cm <sup>2</sup>	
H <sub>req</sub>	36		altura de goma, requerida.
Hr	<b>45</b>	cm	altura de goma, propuesta.
Ks	<b>278</b>	t/m	rigidez horizontal del aislador, proveniente del prediseño.
	2780	kg/cm	
Ac	13865	cm <sup>2</sup>	área requerida del aislador.
D	133	cm	diámetro requerido del aislador.
R	66	cm	
nr	<b>45</b>		número de láminas de goma (impar).
tr	1.00	cm	espesor de láminas de goma.
ts	<b>0.30</b>	cm	espesor placas de acero.
H	58	cm	altura aislador.
S	33		factor de forma de aislador.
Ec	14518	kg/cm <sup>2</sup>	módulo elasticidad sistema compuesto (aislador).
I	15298247	cm <sup>4</sup>	inercia bruta aislador circular.
I <sub>eff</sub>	5099416	cm <sup>4</sup>	inercia efectiva aislador circular.
r	33	cm	radio de giro.
S <sub>2</sub>	3		segundo factor de forma de aislador.
As	17932	cm <sup>2</sup>	área efectiva de corte.
Kv	4473103	kg/cm	rigidez axial aislador.
Kf	1645142609	kg*cm/rad	rigidez a la flexión aislador.

Cargas aisladores (provenientes del análisis estructural)

PLP	<b>96</b>	t	compresión de largo plazo.
PCP	<b>417</b>	t	compresión de corto plazo.

## Pandeo aisladores.

Ps	162	t	carga de corte al desplazamiento de diseño.
PE	278985	t	carga de pandeo de Euler para aislador.
Pcr	12083	t	carga de pandeo de aislador.
pcr	871	kg/cm <sup>2</sup>	tensión de pandeo de aislador.

## Influencia de compresión en rigidez lateral del aislador.

Ks	2777	kg/cm
ΔKs	0.12	%

## Influencia de deformación lateral en compresión crítica de aislador.

cos (θ)	0.85		
θ	0.56	rad	
Ar	983	cm <sup>2</sup>	área reducida.
Pcr'	856	t	carga de pandeo para área reducida.
FU	0.49	<b>Ok!</b>	

## Verificación aisladores

## Deformación angular total

εc	5.49E-03		
γv	2.50		
γM	<b>0.0</b>		
γC	1.09		
γT	3.59		
εb	<b>6.5</b>		
f	<b>0.85</b>		
γlím	5.525		
FS	1.54	>	1.5 <b>Ok!</b>

## Compresión largo plazo aislador.

σ <sub>ADM LP</sub>	<b>120</b>	kg/cm <sup>2</sup>
σ <sub>TRABAJO LP</sub>	6.94	kg/cm <sup>2</sup>
FU	0.06	<b>Ok!</b>

## Placas de acero

fy	<b>2530</b>	kg/cm <sup>2</sup>			
σ <sub>ADM T L P S</sub>	1515	kg/cm <sup>2</sup>			
σ <sub>ADM T C P S</sub>	2015	kg/cm <sup>2</sup>			
σ <sub>C LP</sub>	6.94	kg/cm <sup>2</sup>			
σ <sub>C CP</sub>	424.34	kg/cm <sup>2</sup>			
σ <sub>T LP</sub>	30.86	kg/cm <sup>2</sup>	--->	FU	0.02 <b>Ok!</b>
σ <sub>T CP</sub>	1885.95	kg/cm <sup>2</sup>	--->	FU	0.94 <b>Ok!</b>

## Período aislado.

W	472.22	t	peso sobre base aislada.
nax	5		número de aisladores en dirección X.
nay	4		número de aisladores en dirección Y.
Ks total X	1388	t/m	rigidez lateral conjunto de aisladores en X.
Ks total Y	1111	t/m	rigidez lateral conjunto de aisladores en Y.
TDX	1.17	s	período aislado de diseño en X.
TDY	1.31	s	período aislado de diseño en Y.

## Frecuencia vertical.

Kv total	2236552	t/m	rigidez vertical conjunto de aisladores.
fv	34.29	Hz	
fv mín	10	Hz	

## Anexo B: DISEÑO AISLADOR a-3 SEGÚN DISPOSICIONES DE LA NCh2745.OF2003

Propiedades goma de aisladores elastoméricos.

G	<b>8</b>	kg/cm <sup>2</sup>
K	<b>20000</b>	kg/cm <sup>2</sup>
v	<b>0.4997</b>	
Eo	24	kg/cm <sup>2</sup>
Suelo	<b>III</b>	
Zona sísmica	<b>2</b>	

Desplazamiento de diseño.

βD	<b>5</b>	%	
Z	1		
CD	330	mm	
BD	1.00		
DD	330	mm	desplazamiento de diseño.
DTD	387	mm	desplazamiento total de diseño.
DTD'	348	mm	desplazamiento total de diseño capítulo 8 NCh2745.Of2003
DTD_calc	<b>870</b>	mm	desplazamiento total de diseño obtenido de modelación.

Desplazamiento máximo.

βM	<b>5</b>	%	
MM	1.2		
Z	1		
CM	396	mm	
BM	1.00		
DM	396	mm	desplazamiento máximo.
DTM	465	mm	desplazamiento total máximo.
DTM'	418	mm	desplazamiento total máximo capítulo 8 NCh2745.Of2003
DTM_calc	<b>1050</b>	mm	desplazamiento total de máximo obtenido de modelación.

Fuerza lateral mínima en el sistema de aislación.

kDmáx	<b>278</b>	t/m	
	2.72	kN/mm	
Vb	899	kN	fuerza de corte de diseño de sistema de aislación.
Vb'	809	kN	fuerza de corte de diseño de sistema de aislación, capítulo 8.
	83	t	

Dimensionamiento de aisladores circulares

$\gamma$	2.21		
Geff	9.02	kg/cm <sup>2</sup>	
H <sub>req</sub>	34		altura de goma, requerida.
Hr	<b>34</b>	cm	altura de goma, propuesta.
Ks	<b>278</b>	t/m	rigidez horizontal del aislador, proveniente del prediseño.
	2780	kg/cm	
Ac	10476	cm <sup>2</sup>	área requerida del aislador.
D	115	cm	diámetro requerido del aislador.
R	58	cm	
nr	<b>35</b>		número de láminas de goma (impar).
tr	0.97	cm	espesor de láminas de goma.
ts	<b>0.30</b>	cm	espesor placas de acero.
H	44	cm	altura aislador.
S	30		factor de forma de aislador.
Ec	13590	kg/cm <sup>2</sup>	módulo elasticidad sistema compuesto (aislador).
I	8733221	cm <sup>4</sup>	inercia bruta aislador circular.
I <sub>eff</sub>	2911074	cm <sup>4</sup>	inercia efectiva aislador circular.
r	29	cm	radio de giro.
S2	3		segundo factor de forma de aislador.
As	13619	cm <sup>2</sup>	área efectiva de corte.
Kv	4187319	kg/cm	rigidez axial aislador.
Kf	1163582222	kg*cm/rad	rigidez a la flexión aislador.



## Verificación aisladores

## Deformación angular total

$\epsilon_c$	0.00E+00	
$\gamma_v$	3.09	
$\gamma_M$	<b>0.0</b>	
$\gamma_C$	0.00	
$\gamma_T$	3.09	
$\epsilon_b$	<b>6.5</b>	
f	<b>0.85</b>	
$\gamma_{lím}$	5.525	
FS	1.79	>

1.5 **OK!**

## Período aislado.

W	<b>472.22</b>	t	peso sobre base aislada.
nax	<b>5</b>		número de aisladores en dirección X.
nay	<b>4</b>		número de aisladores en dirección Y.
Ks total X	1390	t/m	rigidez lateral conjunto de aisladores en X.
Ks total Y	1112	t/m	rigidez lateral conjunto de aisladores en Y.
TDX	1.17	s	período aislado de diseño en X.
TDY	1.31	s	período aislado de diseño en Y.