



Universidad Católica de Salta

Facultad de Ingeniería

Proyecto Final

“Análisis del Comportamiento de un Edificio con Aislamiento de Base”

Integrantes: -Aguirre, Ramiro Nicolás
 -López de Aparici, Sergio Mauricio

Profesora Guía: - Dra. Quintana, María Virginia

Título:

Ingeniero Civil

Profesor guía:

-Dr. Quintana, María Virginia

Firma:.....

Tribunal Evaluador:

-Dra. Ing. Orosco, Lía

Firma:.....

-Mg. Ing. Lesser, Florencia

Firma:.....

-Mg. Ing. Astorga, Héctor

Firma:.....

Alumnos:

-Aguirre, Ramiro Nicolás

Firma:.....

-López de Aparici, Sergio Mauricio

Firma:.....

Fecha de exposición: / /

Nota:.....

Índice

1. Introducción.....	6
1.1 Justificación del Problema	7
1.2 Objetivos Generales.....	8
1.3 Objetivos Específicos.....	8
1.4 Metodología a emplear	8
1.5 Fundamentos.....	9
2. Planteo del Problema.....	11
2.1 Edificio. Descripción	11
2.2 Modelado en SAP2000.....	19
2.3 Análisis Dinámico del Edificio.....	24
3. Sistema de aislación.....	32
3.1 Definición.....	32
3.2 Dimensionado de los aisladores.....	36
3.3 Modelado de los aisladores en Sap 2000.....	46
4. Análisis de la Respuesta del Edificio.....	49
4.1 Caso 1. Edificio sin aislación de base	49
4.2 Caso 2. Edificio con aislación de base.....	56
4.3 Comparación de resultados-Estructura con y sin aisladores	62
5. Análisis de rigideces de piso.....	69
5.1 Análisis de rigidez sin aislador.....	69
5.2 Análisis de rigidez con aislador.....	70
5.3 Comparación de Rigideces.....	71
6. Análisis de confort.....	73
7. Conclusiones.....	76
8. Bibliografía.....	77
9. Anexos	78
9.1 Norma INPRES CIRSOC 103.....	78
9.2 Catálogo Dynamic Isolation Systems.....	80
9.3 Ejemplos de estructuras con aislamiento basal sísmico.....	81

Abstract

La ciudad de Salta se encuentra en una zona de peligrosidad sísmica elevada. Es por esto que el análisis sísmico es un tema de fundamental importancia a la hora de diseñar la estructura de un edificio. En este trabajo se estudia el uso de aisladores elastoméricos de base con núcleo de plomo (LRB) en un edificio de 32 metros de altura, un tamaño de construcción habitual en esta ciudad. Se analiza el edificio con y sin el sistema de aislación, buscando comparar el comportamiento de ambos y así evaluar los posibles beneficios de aplicar esta tecnología. En los análisis se contempla los desplazamientos de la estructura, sus períodos y esfuerzos. Además, se realiza una comparación de rigideces de las estructuras y un análisis del confort del edificio frente al accionar de un sismo, para los casos con y sin la aislación de base.

1. Introducción

Este trabajo constituye el análisis del comportamiento de un edificio mediante el método modal espectral, considerando dos casos a saber: el primer caso con la estructura convencional del edificio. En el segundo caso se incorpora un sistema de aislación de base del tipo LRB en la unión de la superestructura con las bases. El edificio en cuestión está emplazado en la ciudad de Salta, la cual se encuentra en una zona de peligrosidad sísmica elevada.

Para el análisis se utilizó el proyecto de un edificio ubicado en calle 12 de Octubre N°884. Este cuenta de 8 pisos y 24 unidades funcionales, con una altura total de 32,50 m, y una superficie de 1.951,32 m². El mismo tiene estructura aporticada y una altura convencional en edificios de vivienda en Salta.

En la primera parte del trabajo se plantea el problema, describiendo el edificio, las variables consideradas, los parámetros necesarios. Posteriormente se modela el edificio y se trabaja en el análisis dinámico del mismo, definiendo todos los parámetros necesarios y cargando los mismos en el programa de computadora. Para el modelado se utilizó el programa Sap2000 v20.2.0. Se siguieron los lineamientos del reglamento argentino INPRES-CIRSOC 103 que rige la construcción de las estructuras sismo resistentes.

En esta primera parte del trabajo se dimensiona el aislador a implementar utilizando como base el “Uniform Building Code” (UBC) del año 1997. En este caso se utiliza aisladores con núcleo de plomo (LRB) y se sigue los lineamientos del proveedor “Dynamic Isolation Systems” (DIS). Una vez diseñado el aislador, se duplica el modelo de edificio, incorporándose en este segundo la aislación de base conforme a los parámetros obtenidos.

En la segunda parte del trabajo se analiza los modelos de edificios en ambos casos (con y sin la aislación de base). En esta etapa se calcula los períodos, frecuencias, masas, desplazamientos tanto relativos (derivadas) como absolutos, y esfuerzos en determinados elementos estructurales. Luego se realiza una comparación de los resultados obtenidos en cada caso, presentando conclusiones al respecto.

Posteriormente se realiza un análisis de rigideces del edificio, con y sin la aislación de base, para observar la influencia de la variación del apoyo en la base de las columnas.

Finalmente se realiza un análisis de “confort del edificio” de ambos casos, basado en las vibraciones y aceleraciones del mismo, y como afectan estas a sus ocupantes, usando como bases los estudios del investigador Fu-Kuei Chang de Nueva York, Estados Unidos.

1.1. Justificación del Problema

Un sismo se define como el movimiento de la tierra producido por la liberación de energía acumulada hacia la superficie a causa de la ruptura o movimiento friccional de las placas tectónicas. Existen otras causas para desatar este movimiento de la masa terrestre menos comunes como: la deformación de estratos cercanos a una falla activa, procesos volcánicos, hundimiento por erosión de aguas subterráneas y explosiones producidas por el hombre. En Argentina, la subducción (movimiento de la placa de Nazca en el sentido Oeste-Este por debajo de la placa Sudamericana) y las fallas geológicas son la principal causa de estos movimientos. Se dan con mayor frecuencia en las provincias ubicadas al oeste de nuestro país: Mendoza, San Juan, Catamarca, La Rioja, Salta y Jujuy. Particularmente la ciudad de Salta se encuentra ubicada en una zona de peligrosidad sísmica de grado 3 según la clasificación realizada por el INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). Es por esto que es de fundamental importancia tener en cuenta la acción del sismo en las estructuras de los edificios.

El daño producido por un evento sísmico puede ocasionar un costo elevado no solo a nivel de infraestructura sino también social. En el caso de estructuras esenciales como hospitales, edificios gubernamentales, e infraestructuras que alberguen un gran número de personas el tipo de daño que produce un movimiento telúrico debería ser mínimo o nulo, puesto que dichas estructuras deben estar en operación para atender las necesidades de la ciudadanía después de un evento. Como consecuencia se han buscado metodologías de diseño en las cuales la protección de la vida, integridad y funcionalidad estructural son los objetivos principales para mitigar los efectos devastadores de fenómenos naturales como los sismos.

Hoy en día el diseño por resistencia, ductilidad y disipación permiten que la estructura o un sistema complementario a éste pueda manejar de una u otra forma la energía transmitida por un evento sísmico.

El diseño por resistencia involucra el dimensionamiento de elementos de tal forma que puedan soportar las cargas producidas por un evento sísmico en el rango elástico, es decir, que en cualquier punto del elemento la resistencia sea mayor a la sollicitación. El diseño por ductilidad permite a la estructura disipar energía a través de daño localizado en elementos estructurales debidamente diseñados como son las rótulas plásticas. El diseño por disipación contempla elementos o un conjunto de ellos llamados el sistema de control, cuyo objetivo específico es el de manejar las fuerzas sísmicas evitando que la estructura se vea afectada.

El diseño por disipación ha tenido su aplicación en las últimas décadas en países con alta peligrosidad sísmica. Una de las metodologías más usadas es el aislamiento basal.

Este sistema desacopla la estructura del suelo aislando la misma de los efectos sísmicos transmitidos por este medio. El aislamiento sísmico se basa en el concepto de reducir la demanda sísmica en vez de incrementar la capacidad de resistencia de una estructura. El sistema de aislamiento basal conformado por aisladores elastoméricos con núcleo de plomo LRB (por sus siglas en inglés Lead Rubber Bearing), es uno de los más empleados.

1.2. Objetivo Generales

Analizar los efectos de los aisladores de base LRB sobre el diseño de un edificio tipo de mediana altura (32 metros), muy común en la ciudad de Salta, buscando dar a conocer esta tecnología aplicada a la construcción, con vistas a la mejora del confort habitacional.

1.3. Objetivos Específicos

- Estudio de nueva tecnología aplicada en estructuras sometidas a acciones sísmicas.
- Estudio de fundamentos teóricos del comportamiento de estructuras con aislación de base.
- Estudio del comportamiento del edificio con aislación de base, modelado y análisis.
- Obtención de conclusiones sobre ventajas y desventajas de la utilización de esta nueva tecnología en edificios en la ciudad de Salta.
- Estudio de confort de un edificio tipo en la ciudad de Salta frente al movimiento ocasionado por un sismo, y comparación de su desempeño al aplicarle aisladores de base.

1.4. Metodología a emplear

Para el estudio del tema se utiliza el proyecto de un edificio construido en la ciudad de Salta. El mismo se modela por medio de computadora utilizando el programa Sap2000 v20.2.0., conjuntamente con los aisladores obtenidos según cálculo.

Este se analiza bajo las normativas vigentes en nuestro país para construcciones sismorresistentes, siendo este el reglamento argentino INPRES CIRSOC 103, y para el caso de los aisladores se siguen los lineamientos del UNIFORM BUILDING CODE (UBC) del año 1997 (norma Norteamericana), ya que el reglamento argentino no contempla aún el uso de esta tecnología. El UBC del año 1997 trata los sistemas de aislamiento en la sección 1661 – “Detailed Systems Requirements”, específicamente en la sección 1661.2 “Isolation System” del Volumen 2.

1.5. Fundamentos

El aislamiento basal sísmico consiste en la instalación de un sistema para desacoplar la estructura de la cimentación con el fin de reducir el daño potencial que pueden ocasionar los movimientos sísmicos, alcanzando el objetivo mediante el incremento de la flexibilidad del sistema con un apropiado amortiguamiento. Aunque esta tecnología se denomina nueva dentro del campo constructivo, esta puede encontrarse en diversas estructuras en donde han sido implementadas para solucionar una gran variedad de problemas sísmicos de diseño. En algunas ocasiones el aislamiento sísmico se considera como una opción al momento de requerir cierto nivel de resistencia sísmica y brindar seguridad a estructuras, pudiendo significar en casos una disminución en el costo total, además de mejoras en el confort de sus habitantes. Esta reducción en el costo se puede reflejar en la disminución de fuerzas sísmicas, ductilidad requerida, elementos resistentes más simples y deformaciones estructurales menores puesto que la energía del sismo se concentra en el sistema de aislación.

Las estructuras que poseen un período fundamental entre 0.1 y 1 segundos son particularmente vulnerables bajo eventos sísmicos, debido a que los períodos predominantes se encuentran dentro del rango con la mayor severidad que es de 0.2 a 0.6 segundos, en la cual se podría desarrollar el fenómeno de resonancia en la estructura provocando daños mayores. Mediante el desacoplamiento de la estructura (aislamiento basal) se defleca la energía de ingreso del movimiento sísmico a través de la dinámica del sistema, elongando al período fuera del rango predominante. Este incremento en el período afecta al desplazamiento horizontal en donde el amortiguamiento añadido por el sistema corrige estos incrementos, además de reducir las demandas en los elementos estructurales. El enfoque del sistema de aislamiento radica en cómo minimizar la deriva y aceleración de piso.

En el diseño por ductilidad la energía se disipa por daño y deformación de elementos estructurales formando rotulas plásticas en vigas y en la base de las columnas en el caso de sistemas especiales. Estas deformaciones causan problemas a los elementos no estructurales que no se contemplan en el diseño sismorresistente. A pesar de que el

diseño tradicional permite que fuerzas sísmicas considerables sean transmitidas a la estructura, el problema se produce en proveer la resistencia suficiente. Comparando la acción de un evento sísmico en una misma estructura con las dos metodologías de diseño, se obtiene que la estructura no aislada permite deformaciones y fisuramientos considerables, causando daño en la estructura a causa de la disipación de energía requerida para disipar la energía transmitida por el sismo. En la estructura aislada el desplazamiento horizontal ocurre en la interfaz de aislación reduciendo la transmisión de fuerzas a la estructura, la cual se mueve casi rígidamente.

2. Planteo del Problema

2.1. Edificio. Descripción

Para este trabajo se usa un EDIFICIO DE VIVIENDAS el cual se encuentra emplazado en calle 12 de Octubre N°884 de la ciudad de Salta-Argentina.

Este es un edificio de 8 pisos y 24 unidades funcionales, con una altura total de 32 m, y una superficie de 1.951,32 m² a construir. El mismo tiene una estructura de hormigón armado conformada por pórticos en dos direcciones. Las secciones de vigas y columnas son variables.

El edificio en cuestión es un tipo de construcción en altura convencional que se realiza en la ciudad de Salta con una altura promedio de 30 metros y estructura aporticada. El mismo cuenta con un subsuelo destinado a cochera y equipos de servicio con una superficie total cubierta de 310 m². En la planta baja se encuentra un local comercial y algunas cocheras, siendo su superficie cubierta de 199,3 m².

Del primer al cuarto piso la arquitectura se repite. La superficie total del piso es de 188.90 m².

En las plantas 5 a 8 la arquitectura también se repite. En esta altura el edificio sufre un retiro respecto de la línea municipal de 4 metros. La superficie total por piso en estos casos es de 155,80 m².

Además, cuenta con una azotea accesible, con solárium y quincho. Por encima se encuentran los tanques de reserva de agua.

A continuación, se presenta los planos de arquitectura del edificio.



Fig. N° 1 - Fachada del edificio s/plano

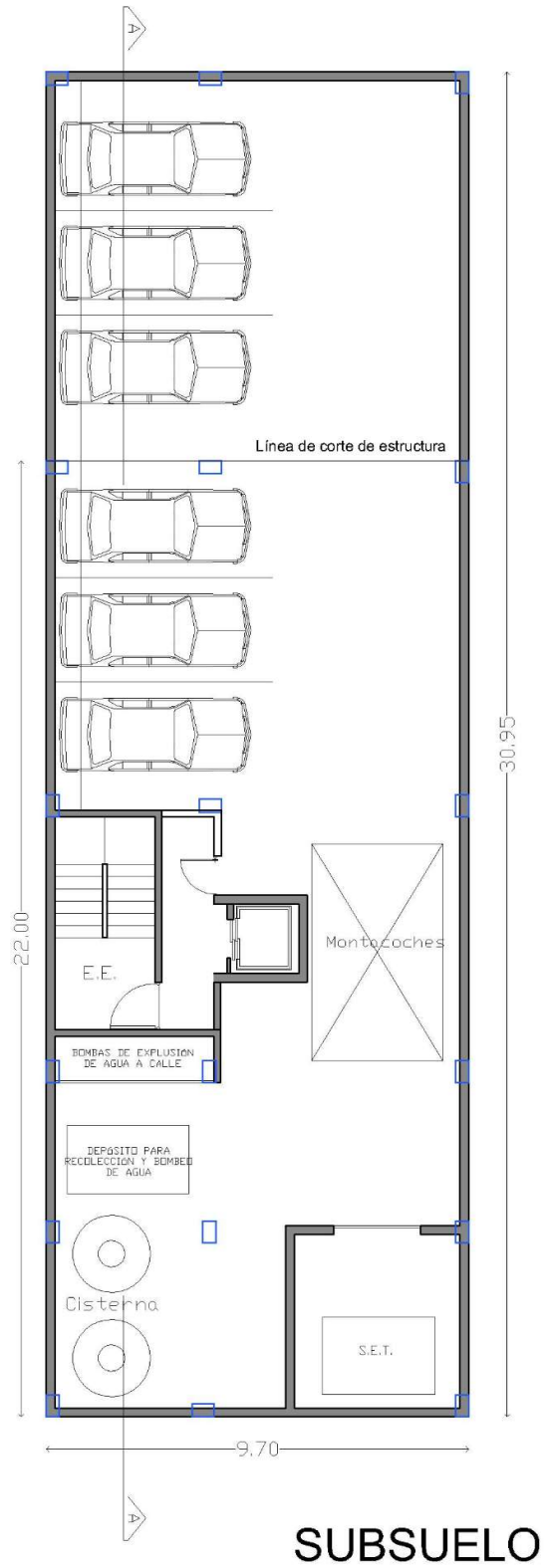
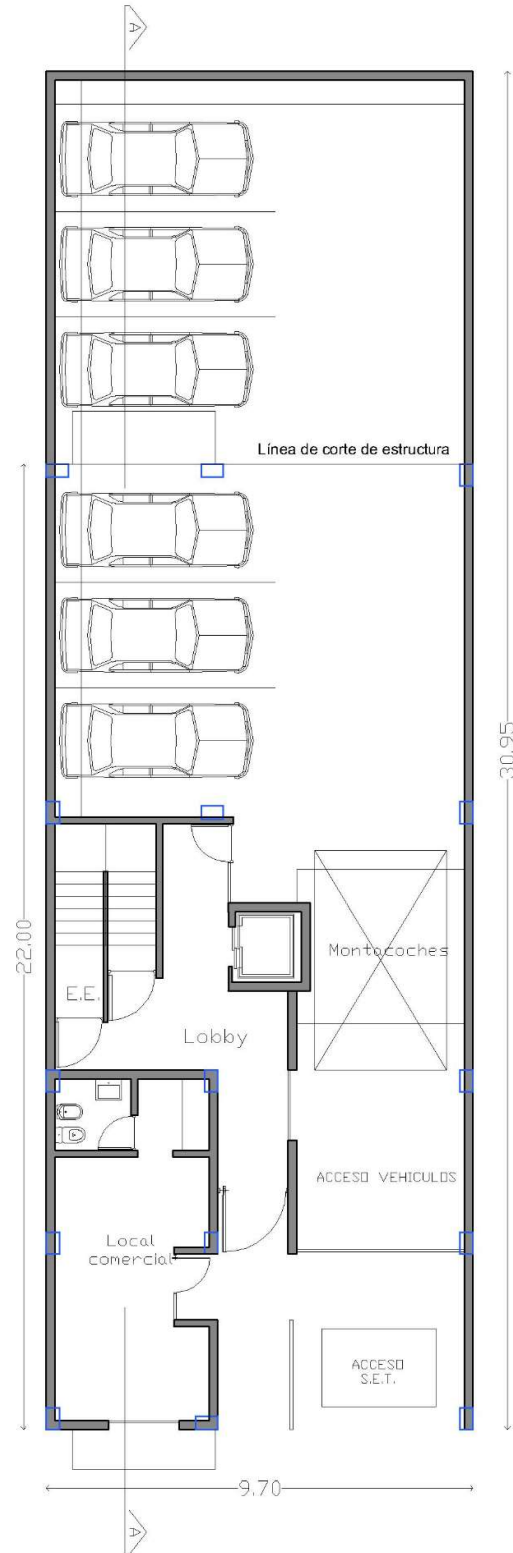


Fig. N° 2 - Planta subsuelo s/ plano



PLANTA BAJA

Fig. N° 3 - Planta baja s/plano



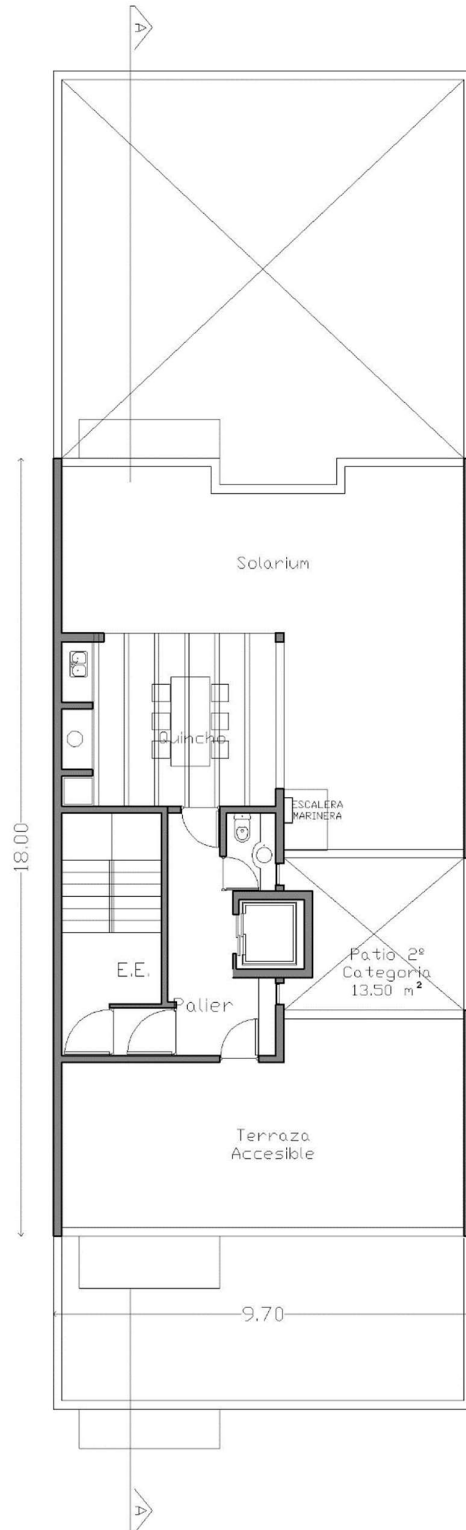
PLANTA 1° A 4°

Fig. N° 4 - Plantas 1 a 4 s/ plano



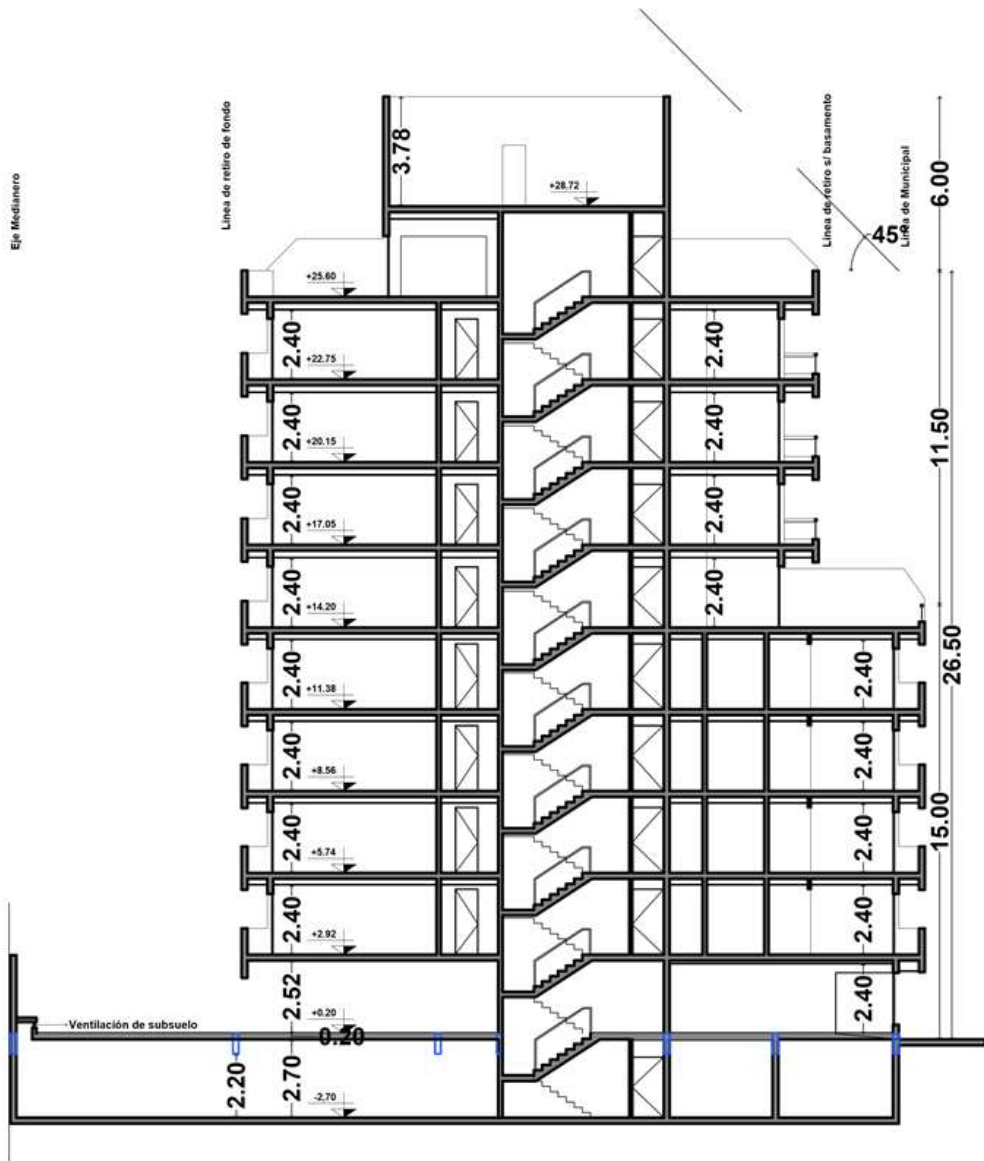
PLANTA 5° A 8°

Fig. N° 5 - Plantas 5 a 8 s/plano



PLANTA AZOTEA

Fig. N° 6 - Planta Azotea s/ plano



SECCION AA

Fig. N° 7 - Seccion AA s/ plano

2.2. Modelado en SAP2000

Para el modelado de la estructura se utiliza el programa Sap2000 v20.2.0. El programa Sap2000 es una plataforma que se basa en elementos finitos, para el modelado, análisis y dimensionado de cualquier estructura.

Se realiza algunas simplificaciones con respecto al proyecto original del edificio de calle 12 de Octubre. Estas son:

- Se realiza una división del edificio en la parte de cocheras, cortando la estructura, ya que este sector no se eleva más allá de la planta baja, y no tiene sentido colocar aisladores en esta zona. Se detalla en los planos de arquitectura la sección de corte.
- Se modifican algunas secciones de columna que eran rectangulares alargadas, por otras rectangulares más cuadradas, para que mantengan una inercia similar en las dos direcciones.
- Se cambia el sistema de casetonado de algunos sectores de planta por losa maciza con espesor equivalente en peso.
- Se supone colocación de tabiques laterales separados de la estructura 15 cm en el subsuelo para contener el empuje del suelo en los laterales y que se permita el libre movimiento de la estructura y los aisladores, sin limitar su funcionamiento.

Para el caso del edificio con aisladores elastoméricos, cabe aclarar que los mismos se ubican por debajo del subsuelo, en la unión de la superestructura con las bases del edificio, colocados a modo de fuste sobre estas. No se modifica la estructura original del edificio, sino simplemente se modifica su vinculación al terreno para limitar el análisis al comportamiento de los casos con y sin los aisladores LRB.

El proceso de modelado se realiza de la siguiente forma:

1- Se modelan todas las vigas, siguiendo plantillas creadas en AutoCad, y se le asignan sus secciones y materiales correspondientes. Luego se crean las columnas y losas, y todo el sistema de escalera con sus losas, vigas y columnas propias, siempre asignando sus configuraciones seccionales y de materiales.

Se establece el uso de hormigón tipo H-25 con un $f'_c=25$ MPa.

En cuanto a las reducciones de rigidez se utiliza los siguientes valores:

Vigas: $0.4 I_g$ (Secciones de vigas rectangulares)

Columnas: $0.8 I_g$

-Momentos de inercia efectivos de las secciones de vigas y columnas, de acuerdo a la parte II del reglamento Inpres-Cirsoc 103.

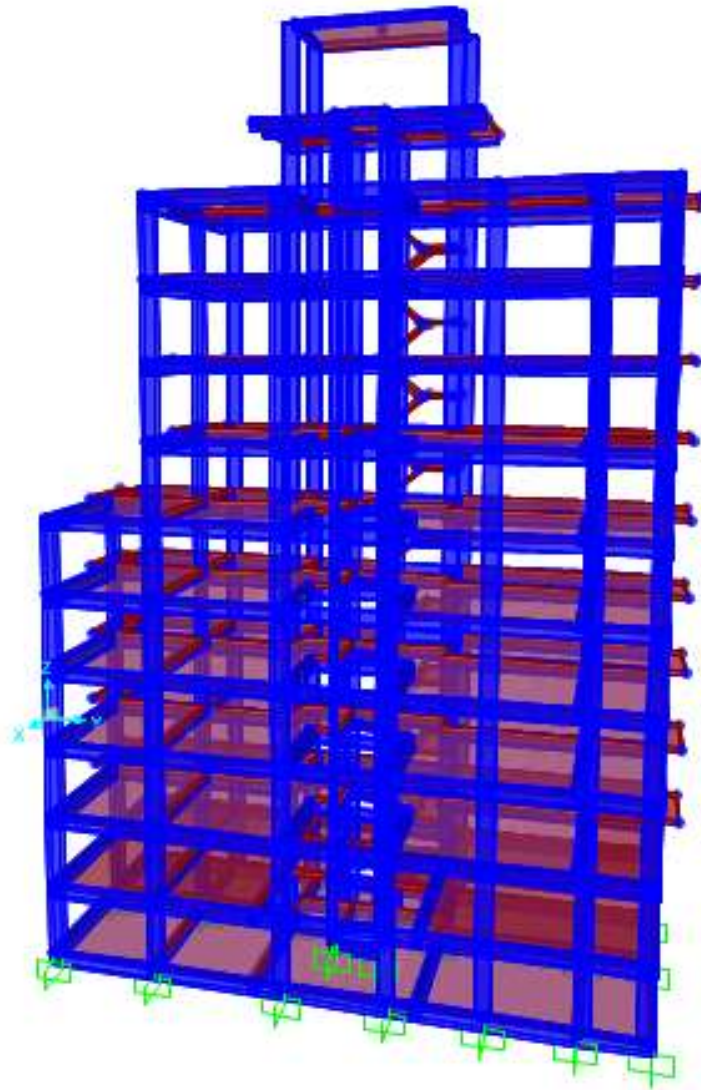


Fig. N° 8 - Modelado de la estructura del edificio en SAP2000

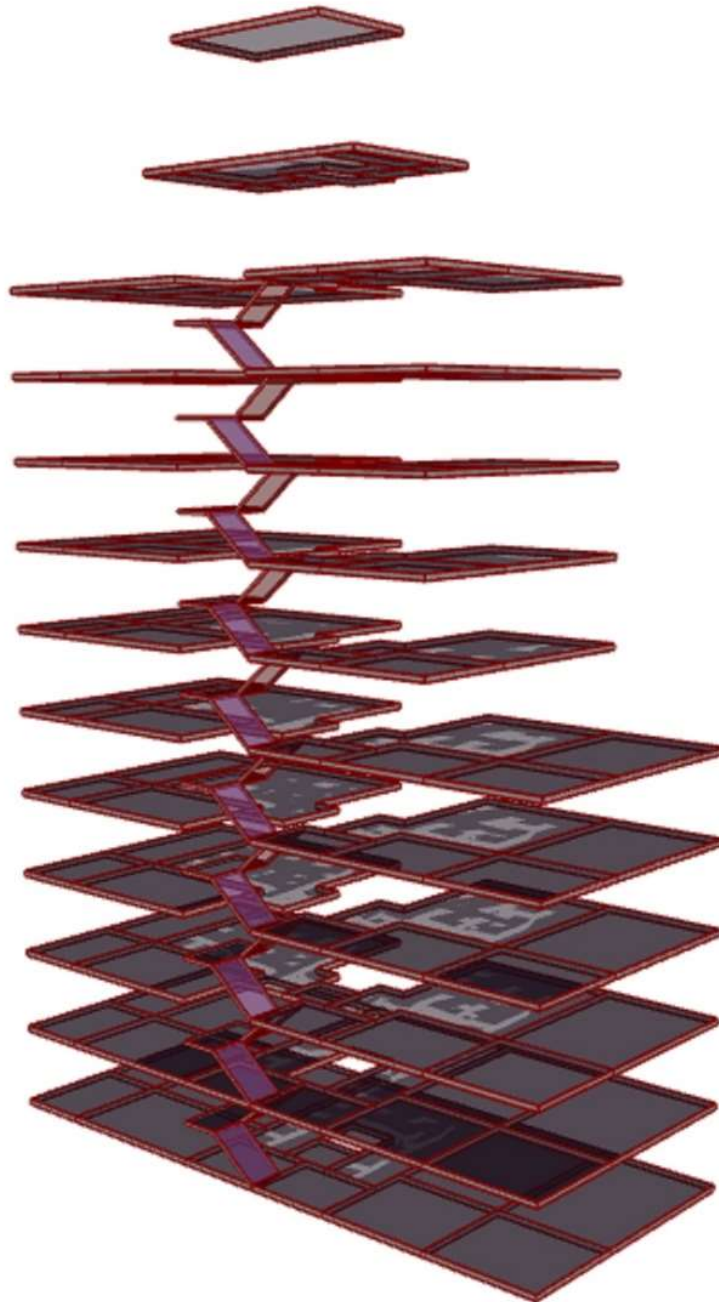


Fig. N° 9 - Modelado de las losas y escaleras en SAP2000

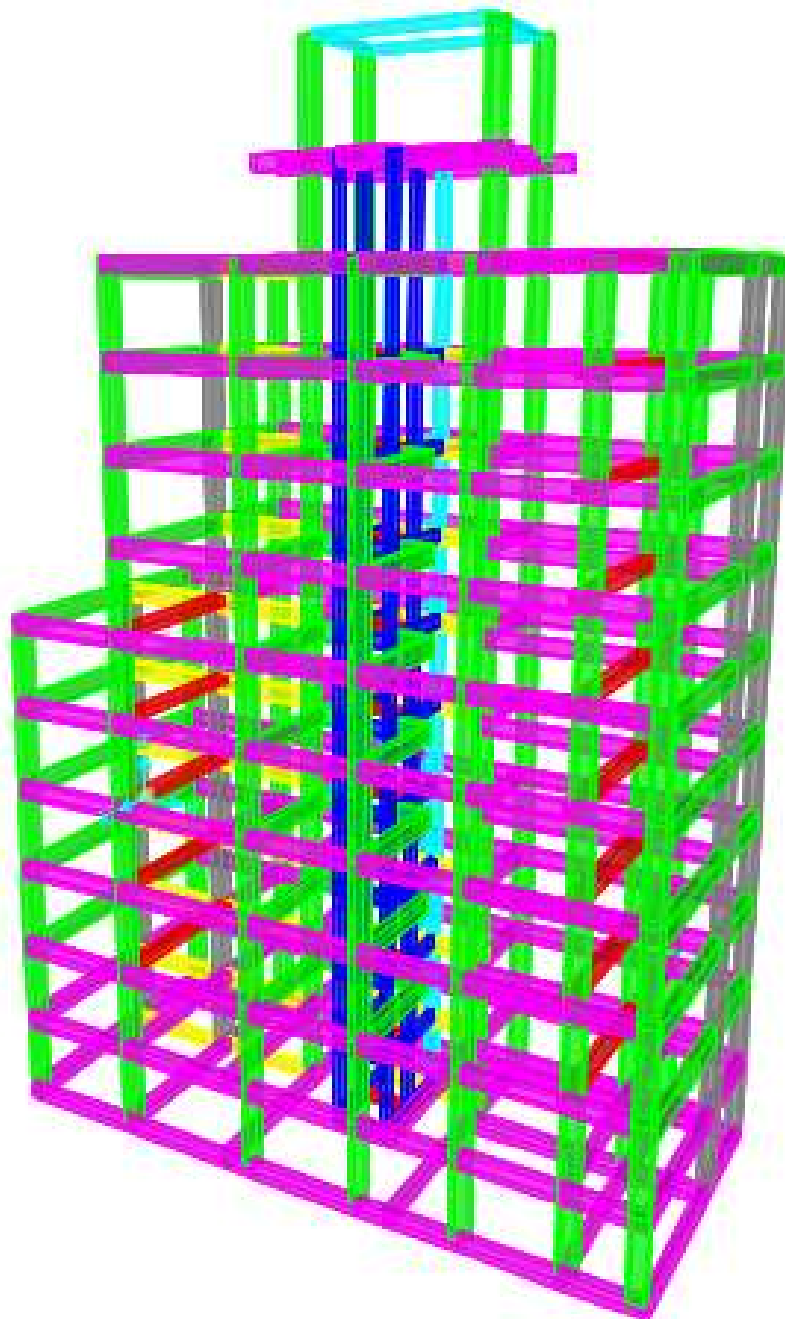


Fig. N° 10 - Diferenciación de secciones por color en SAP2000

Secciones

Tabla 1 - Columnas

Columnas (cm)	Cantidad
20x40	22
40x25	44
40x55	150
55x40	36

Tabla 2 - Vigas

Vigas (cm)	Cantidad
20x30	26
20x50	37
20x60	14
25x40	56
25x50	6
30x50	206
30x60	71
50x30	14

2- Asignación de cargas muertas y sobrecargas correspondientes sobre cada losa y las cargas lineales sobre vigas. Los muros interiores que no se encuentran apoyados sobre vigas son distribuidos como cargas superficiales en las losas. Para las cargas se utiliza el reglamento CIRSOC 101 (Reglamento argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras).

Las sobrecargas aplicadas son:

Tabla 3 – Sobrecargas por nivel

Sobrecargas	
Subsuelo	KN/M2
Garage	2.5
Escaleras y pasillos zona escalera	5
Planta Baja	KN/M2
Escaleras y pasillos zona escalera	5
Corredor PB	5
Comercio PB	5
Pisos 1° a 9°	KN/M2
Sector residencial excepto balcones	2
Balcones	5
Escaleras y pasillos zona escalera	5
Corredores (igual al destino que sirven)	5
Azotea	KN/M2
Azotea donde puede congregarse gente	5
Zona de tanque de agua	KN/M2
Azotea inaccesible	1

2.3. Análisis Dinámico del Edificio

El método utilizado para el análisis es el método dinámico modal espectral, el cual considera el uso de un espectro de diseño para realizar la superposición modal. Se limita el análisis al estudio del comportamiento del edificio bajo las acciones horizontales generadas por el sismo en ambas direcciones y a su primer modo de vibración.

Definición de las condiciones del edificio según INPRES-CIRSOC 103: Este reglamento se aplica a todas las construcciones nuevas que se realicen dentro del territorio de la República Argentina, al refuerzo de las construcciones existentes ejecutadas sin

previsiones sismorresistentes y a la reparación de las construcciones que resultaran dañadas por la acción de los sismos.

- Zonificación sísmica: Zona 3 - Peligrosidad elevada. Aceleración máxima del suelo 0.25g.
- Clasificación de la construcción según su destino y función: Grupo B: Construcciones cuyo colapso produciría pérdidas de magnitud intermedia. Ej.: viviendas, edificios privados de habitación, edificios comerciales, industriales y de uso público no comprendidos en el grupo A.

Tabla 4 – Tabla extraída de Norma INPRES CIRSOC 103

Construcción	δd
Grupo A0	1,4
Grupo A	1,3
Grupo B	1

- Clasificación del sitio-Influencia del suelo

Suelo tipo 2 –Sc: Suelo cohesivo consistente, de baja plasticidad. Gravas y/o arenas de baja densidad.

La elección del tipo de suelo se realiza en base a estudio de suelo de edificación cercana al sitio en cuestión.

- Factor de reducción “R”: 5. Tabla 5.1 de INPRES-CIRSOC 103.

El reglamento establece que el valor “R” no puede ser mayor a 6 para un sistema de pórtico con ductilidad completa. Se tomó al edificio con ductilidad limitada, estableciendo $R = 5$.

Procedimiento de cálculo

1- Definición de diafragmas rígidos. Se crea un diafragma rígido por cada nivel, incluidas la azotea y la zona del tanque de agua.

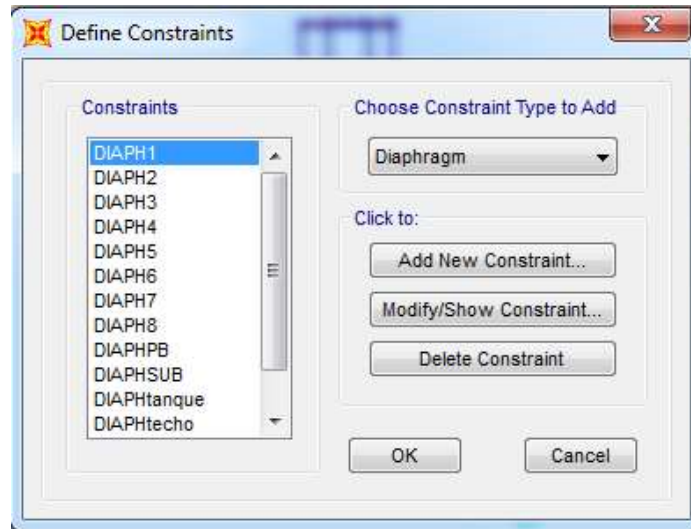


Fig. N° 11 - Cuadro de diálogo Sap2000 diafragmas rígidos

2- Definición de fuente de masa. Se utiliza la combinación:

$$1D+0.25L$$

De acuerdo a tabla 3.3 de INPRES-CIRSOC 103 – “Acciones gravitatorias a considerar para evaluar la acción sísmica horizontal”

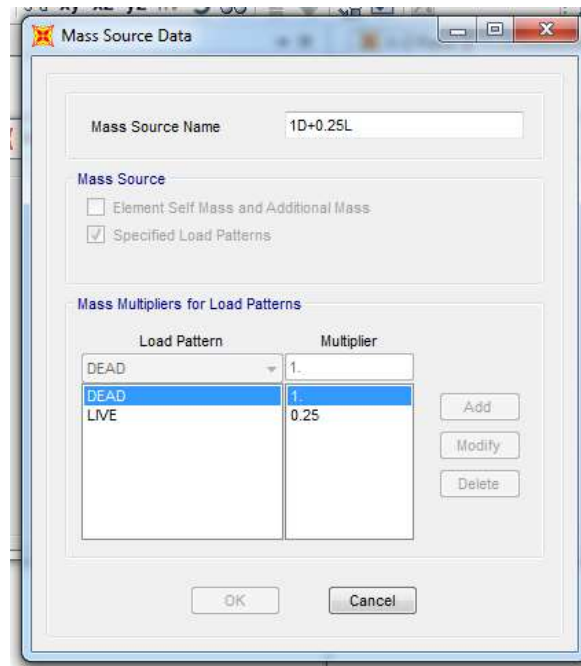


Fig. N° 12 - Cuadro de diálogo Sap 2000 “Fuente de masa”

3- Definición del caso modal

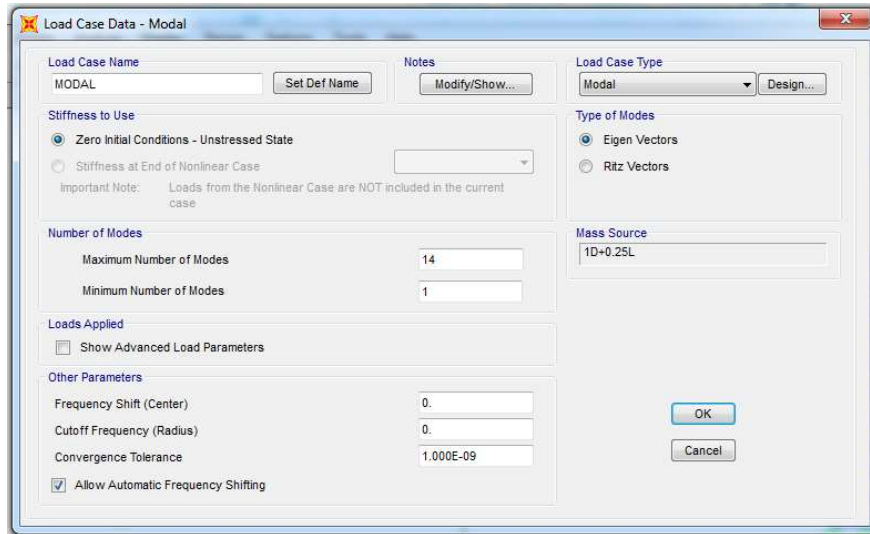


Fig. N° 13 - Cuadro de diálogo Sap 2000 “Definición de caso modal”

4- 90%. Períodos y verificación del porcentaje de participación de masas mayor al

Tabla 5 – Participación de masa

Caso	Modo	Periodo	Frecuencia	PM en X	PM en Y
		Seg	Hz		
MODAL	1	1.47	0.68	0.703	0.002
MODAL	2	1.28	0.78	0.710	0.734
MODAL	3	1.15	0.87	0.765	0.765
MODAL	4	0.51	1.97	0.875	0.765
MODAL	5	0.46	2.17	0.877	0.839
MODAL	6	0.43	2.31	0.878	0.871
MODAL	7	0.29	3.40	0.910	0.871
MODAL	8	0.28	3.61	0.910	0.891
MODAL	9	0.25	3.96	0.910	0.903
MODAL	10	0.23	4.32	0.919	0.903
MODAL	11	0.23	4.38	0.928	0.903
MODAL	12	0.21	4.67	0.928	0.922
MODAL	13	0.18	5.71	0.941	0.922
MODAL	14	0.16	6.19	0.941	0.930
PM: Participación de masa					

El período fundamental del edificio es 1.47 segundos.

5- Definición del espectro de diseño. El programa Sap2000 define el valor de pseudo aceleración S_a como cocientes de gravedad. Es decir, divide los valores obtenidos en la aceleración de la gravedad.

Tabla 6 – Espectro de diseño

T	S_a	S_a
Seg	m/s ²	g
0	0.569	0.058
0.1	1.230	0.1254
0.2	1.422	0.145
0.3	1.422	0.145
0.4	1.422	0.145
0.5	1.422	0.145
0.6	1.422	0.145
0.7	1.312	0.1337
0.8	1.148	0.117
0.9	1.020	0.104
1	0.918	0.0936
1.2	0.765	0.078
1.5	0.612	0.0624
1.7	0.541	0.0551
2	0.459	0.0468
2.5	0.367	0.0374
3	0.306	0.0312
3.5	0.262	0.0267
4	0.230	0.0234
5	0.183	0.0187
8	0.115	0.0117

6- Definición de casos sísmicos tipo “Response Spectrum” S_x y S_y .

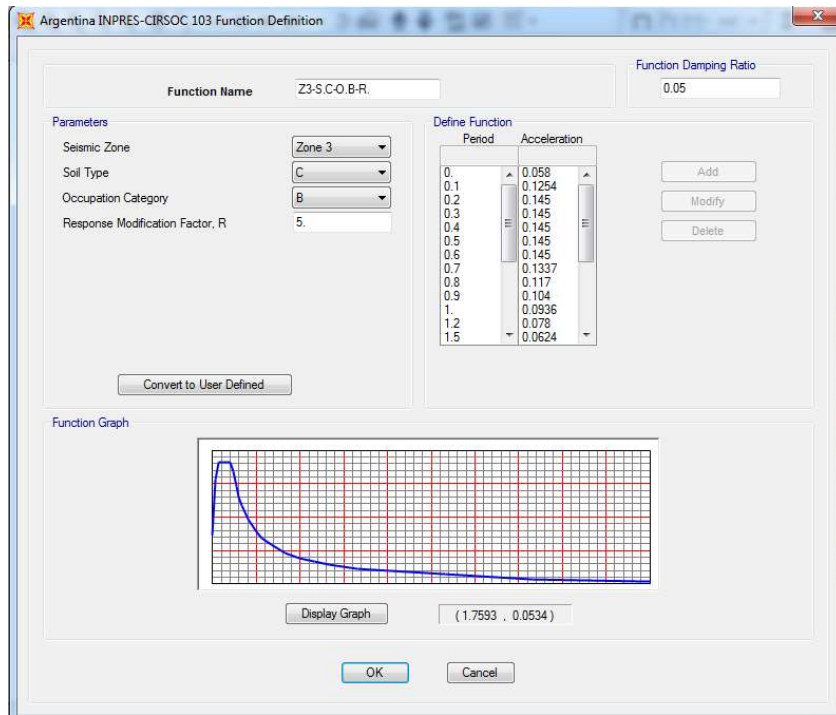


Fig. N° 14 - Cuadro de diálogo Sap 2000 “Definición de espectro de diseño”

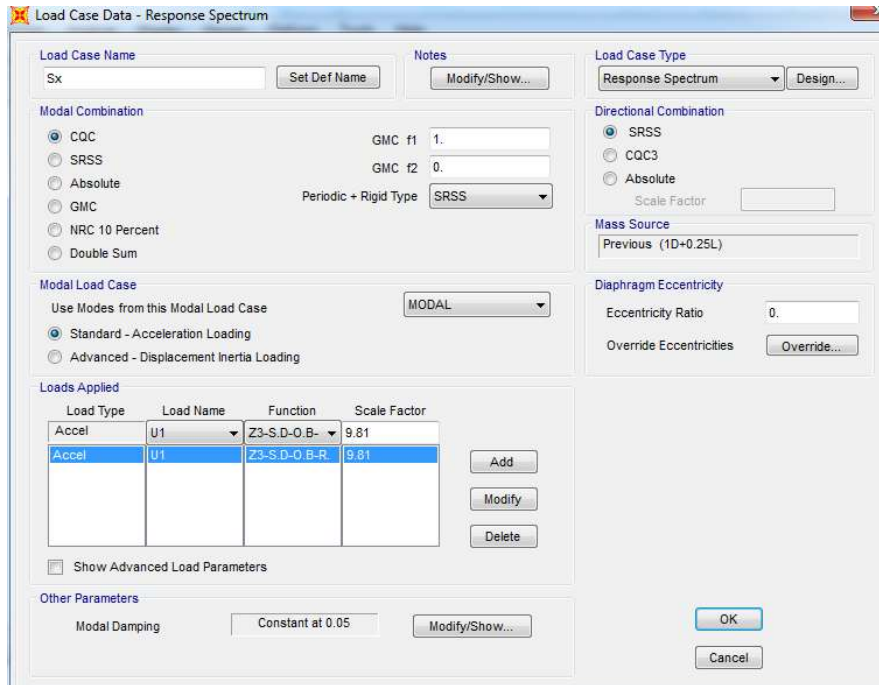


Fig. N° 15 - Cuadro de diálogo Sap 2000 “Definición de caso sísmico Sx”

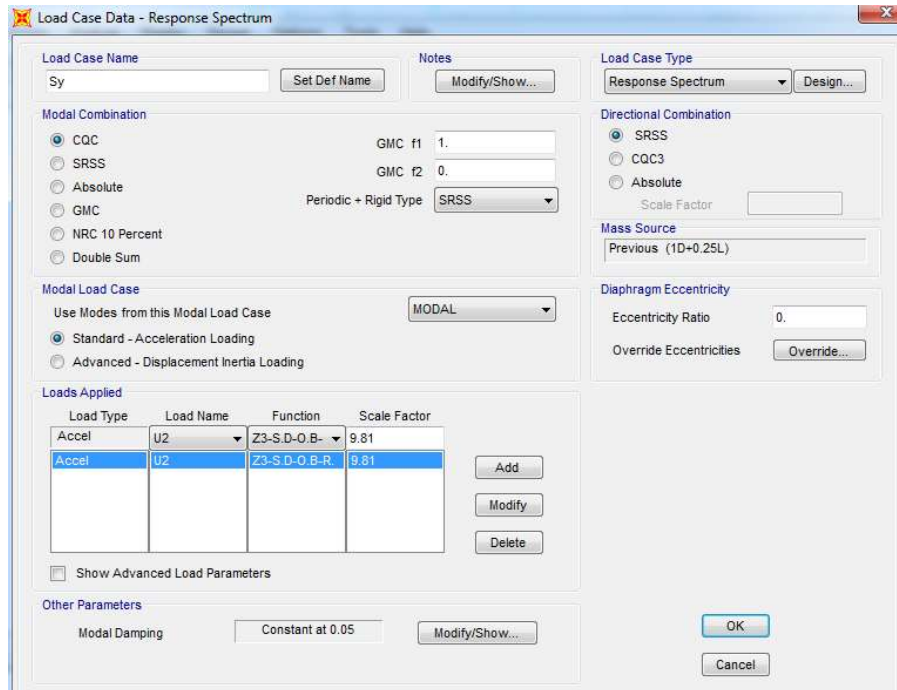


Fig. N° 16 - Cuadro de diálogo Sap 2000 “Definición de caso sísmico Sy”

7- Creación de combinación de peso sísmico y cálculo de peso sísmico por nivel.

Tabla 7 – Peso Sísmico por nivel

Nivel	H (m)	$\Sigma W_{sismico}$ (KN)
Techo	32.48	0
Tanque	28.7	206
Terraza	25.58	810
8	22.73	2816
7	19.88	4943
6	17.03	7069
5	14.18	9195
4	11.36	11736
3	8.54	14276
2	5.72	16817
1	2.9	19355
PB	0.18	21885
Subsuelo	-2.47	24085

8- Verificación de efecto P-Delta.

$$CE = \frac{Pk * \Delta sk * \gamma r}{Vk * hsk * Cd}$$

$CE \geq 0.1$ Considero efecto P-Delta

Cd: Factor de amplificación de deformaciones (Tabla 5.1 Factores de comportamiento – INPRES-CIRSOC 103).

γr : Factor de riesgo. (Clasificación de las construcciones según su destino y funciones-INPRES-CIRSOC 103).

Δsk : Diferencia entre desplazamientos horizontales correspondientes a cabeza y pie de nivel K, medidos en el borde más desfavorable de la construcción.

Vk: Esfuerzo de corte en el nivel k.

Hsk: Altura de nivel o piso K, comprendida entre los niveles K y K+1.

Pk: Carga gravitatoria total operante sobre el nivel K, incluido este.

Cd: 4.5 γr : 1 (Grupo B)

Tabla 8 – Verificación efecto P-Delta en dirección X

Dirección X								
Caso de carga		Wsísmico			Sx			
Nivel	H (m)	h relativa (cm)	Σ Wsísmico	Vx (KN)	Δ elastico (cm)	δ elastico (cm)	CE	Conclusión
Techo	32.48		0	0	4.80			
Tanque	28.7	378	219	47	4.42	0.39	0.0011	No considerar P-Delta
Terraza	25.58	312	946	146	4.31	0.11	0.0005	No considerar P-Delta
8	22.73	285	3104	361	4.08	0.22	0.0015	No considerar P-Delta
7	19.88	285	5314	560	3.77	0.31	0.0023	No considerar P-Delta
6	17.03	285	7524	722	3.39	0.38	0.0031	No considerar P-Delta
5	14.18	285	9734	854	2.75	0.64	0.0057	No considerar P-Delta
4	11.36	282	12377	979	2.32	0.43	0.0043	No considerar P-Delta
3	8.54	282	15019	1098	1.85	0.47	0.0050	No considerar P-Delta
2	5.72	282	17661	1208	1.36	0.50	0.0057	No considerar P-Delta
1	2.9	282	20301	1304	0.84	0.52	0.0064	No considerar P-Delta
PB	0.18	272	22931	1378	0.33	0.50	0.0068	No considerar P-Delta
Subsuelo	-2.47	265	25385	1411	0.00	0.33	0.0050	No considerar P-Delta

Tabla 9- Verificación efecto P-Delta en dirección Y

Dirección Y								
Caso de carga		Wsísmico			Sy			
Nivel	H (m)	h relativa (cm)	Σ Wsísmico	Vy (KN)	Δ elastico (cm)	δ elastico (cm)	CE	Conclusión
Techo	32.48		0	0	4.24			
Tanque	28.7	378	219	44	4.01	0.23	0.0007	No considerar P-Delta
Terraza	25.58	312	946	145	3.84	0.17	0.0008	No considerar P-Delta
8	22.73	285	3104	384	3.64	0.20	0.0012	No considerar P-Delta
7	19.88	285	5314	607	3.37	0.27	0.0019	No considerar P-Delta
6	17.03	285	7524	791	3.02	0.35	0.0026	No considerar P-Delta
5	14.18	285	9734	942	2.63	0.39	0.0032	No considerar P-Delta
4	11.36	282	12377	1095	2.22	0.40	0.0036	No considerar P-Delta
3	8.54	282	15019	1236	1.77	0.45	0.0043	No considerar P-Delta
2	5.72	282	17661	1362	1.28	0.49	0.0050	No considerar P-Delta
1	2.9	282	20301	1466	0.77	0.52	0.0056	No considerar P-Delta
PB	0.18	272	22931	1541	0.29	0.48	0.0058	No considerar P-Delta
Subsuelo	-2.47	265	25385	1572	0.00	0.29	0.0039	No considerar P-Delta

3. Sistema de aislamiento

3.1. Definición

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, LRB (por sus siglas en inglés Lead Rubber Bearing), están formados por un conjunto de láminas de goma (elastómero) con placas de acero intercaladas entre sí, logrando la adherencia de estos materiales gracias a la vulcanización de la goma al aplicar presión a alta temperatura en el momento de su manufacturación. Este conjunto de láminas incluye un núcleo de plomo extruido generalmente de forma circular. El elastómero es un polímero elástico o goma, compuesto normalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno o silicio cuya característica principal es su alta elasticidad y flexibilidad frente a cargas antes de fracturarse. Muchas de las razones por las cuales el plomo se utiliza como núcleo en este tipo de aisladores son la fluencia del mismo bajo esfuerzos de corte con deformaciones relativamente bajas, comportándose como un sólido elásto-plástico. La restauración de sus propiedades mecánicas durante la deformación del mismo a temperatura ambiente le otorga buenas características de fatiga. El plomo es un material con las siguientes características mecánicas bajo deformación plástica: endurecimiento por deformación, recristalización (formación de nuevos granos no deformados) y crecimiento de granos.

La flexibilidad del elastómero permite grandes desplazamientos laterales, y las placas de acero proporcionan al conjunto gran rigidez vertical. El núcleo de plomo proporciona una capacidad adicional de disipar energía sobre el elastómero, así como también aporta a la rigidez vertical del conjunto.

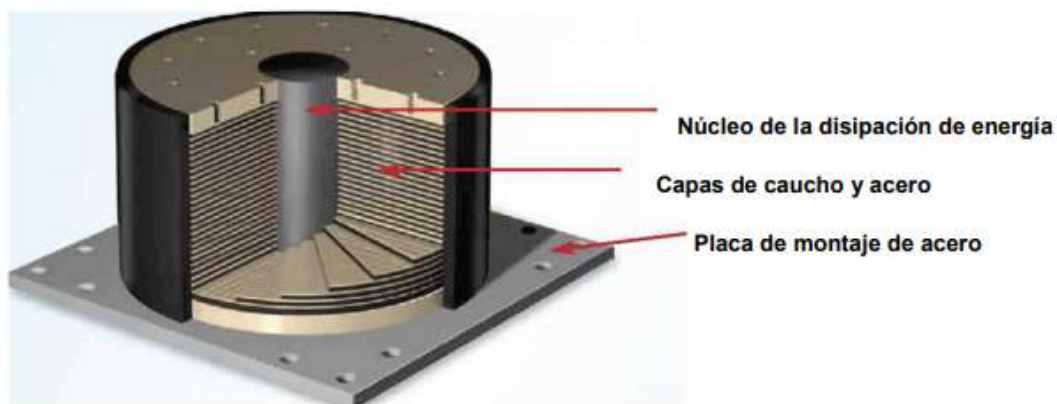


Fig. N° 17 - Partes aislador LRB

El comportamiento del aislador elastomérico con núcleo de plomo depende de la fuerza lateral a la que se le somete. Cuando la carga lateral es baja esta será absorbida por el núcleo de plomo manteniendo el sistema en la zona elástica. Al aumentar la carga

lateral el núcleo de plomo comienza a experimentar deformación hasta un punto en el cual comienza a fluir y disipar energía.

La función principal de los aisladores sísmicos es desacoplar la infraestructura de la superestructura, y así reducir las fuerzas que actúan sobre el edificio durante un sismo. Mediante el desacoplamiento de la estructura se evita el ingreso del movimiento sísmico a través de la dinámica del sistema a la estructura, reduciendo las demandas en los elementos estructurales. Por otro lado se enfoca en como minimizar la deriva y aceleración de piso, ya que estas son inversamente proporcionales en cuanto a solución se trata. Derivas altas se pueden corregir mediante aumento de la rigidez en la estructura, mientras que la aceleración de piso se puede corregir con una flexibilidad mayor de la estructura, lo que empeora la deriva. Otra característica muy importante es que elongan el período fundamental de la estructura, sacándolo de un rango en el que se podría desarrollar el fenómeno de resonancia provocando daños mayores.

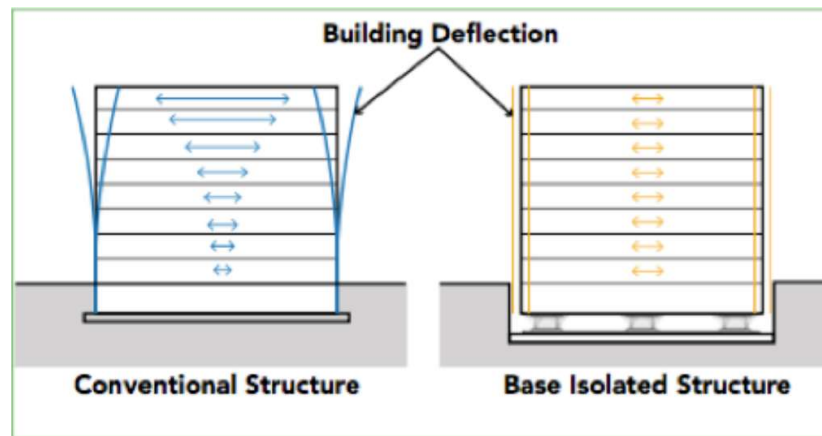


Fig. N° 18 - Comparación entre estructura convencional y aisladas

Los aisladores con núcleo de plomo producen una curva de histéresis con una combinación de relaciones fuerza – deformación por cortante. Esto se debe a la combinación del elastómero y el plomo como núcleo. Se puede considerar que la curva fuerza-deformación equivale a la superposición de rigidez de estos elementos. La rigidez inicial (elástica) viene dada por el núcleo de plomo con aportación de rigidez por parte del elastómero, y la rigidez inelástica (post- fluencia) es dada por el elastómero. El aislador se modela como un elemento bilineal.

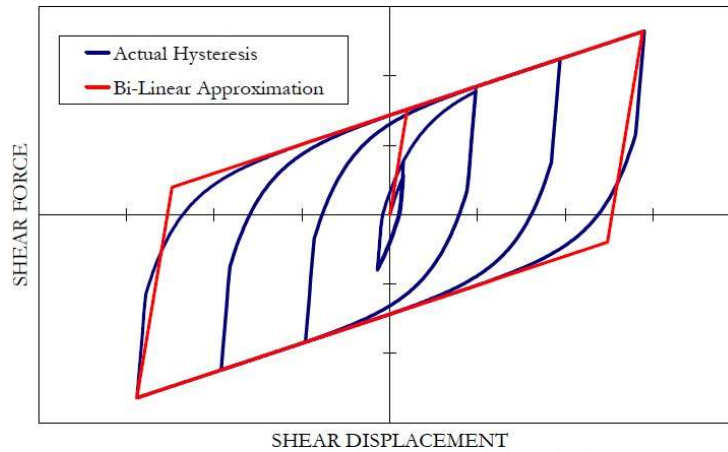


Fig. N° 19 – Curva de histeresis del aislador LRB

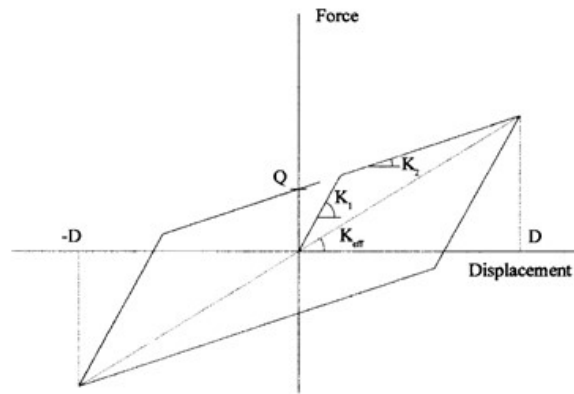


Fig. N° 20 - Características del modelo bilineal del aislador LRB

Rigidez inicial elástica (k_1): Usualmente tomada como un múltiplo de la rigidez post-fluencia por la dificultad de cuantificarla y la introducción de variables en un proceso de cálculo.

$$K_1 = 10 \cdot K_R$$

Rigidez post-fluencia (k_R): Esta se puede determinar de la teoría elástica lineal a partir de las propiedades del elastómero mediante su módulo de corte, área y altura:

$$K_{R \text{ unit}} = \frac{A \cdot G}{Lr}$$

G: Módulo de cortante del elastómero.

A: Área del aislador.

Lr: Altura del elastómero del aislador.

Fuerza característica (Q): Es la fuerza a desplazamiento cero. Se puede estimar del esfuerzo de fluencia del plomo y su área.

$$Q = A_{pb} * \sigma_{pb}$$

Donde:

A_{pb} =Área de plomo

σ_{pb} =Esfuerzo de fluencia del plomo

Rigidez horizontal efectiva del sistema (Keff): De acuerdo con el modelo bilineal se define a la rigidez efectiva como la rigidez secante de los valores picos del ciclo de histéresis, determinado por deducción geométrica como la suma vectorial de las rigideces del sistema.

$$K_{eff} = K_r + Q/D$$

Desplazamiento de fluencia (D_y): Este valor se determina a partir de parámetros principales como rigidez y fuerza característica.

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_R}$$

Energía disipada por ciclo (W): La energía que disipa el aislador se puede tomar como el área del ciclo de histéresis del modelo bilineal.

$$W = 4Q \cdot (D - D_y)$$

Amortiguamiento (β): El modelamiento de aislador se considera de amortiguamiento viscoso razón por la cual se puede determinar el amortiguamiento efectivo como:

$$\beta = \frac{W_D}{2\pi K_{eff} D^2}$$

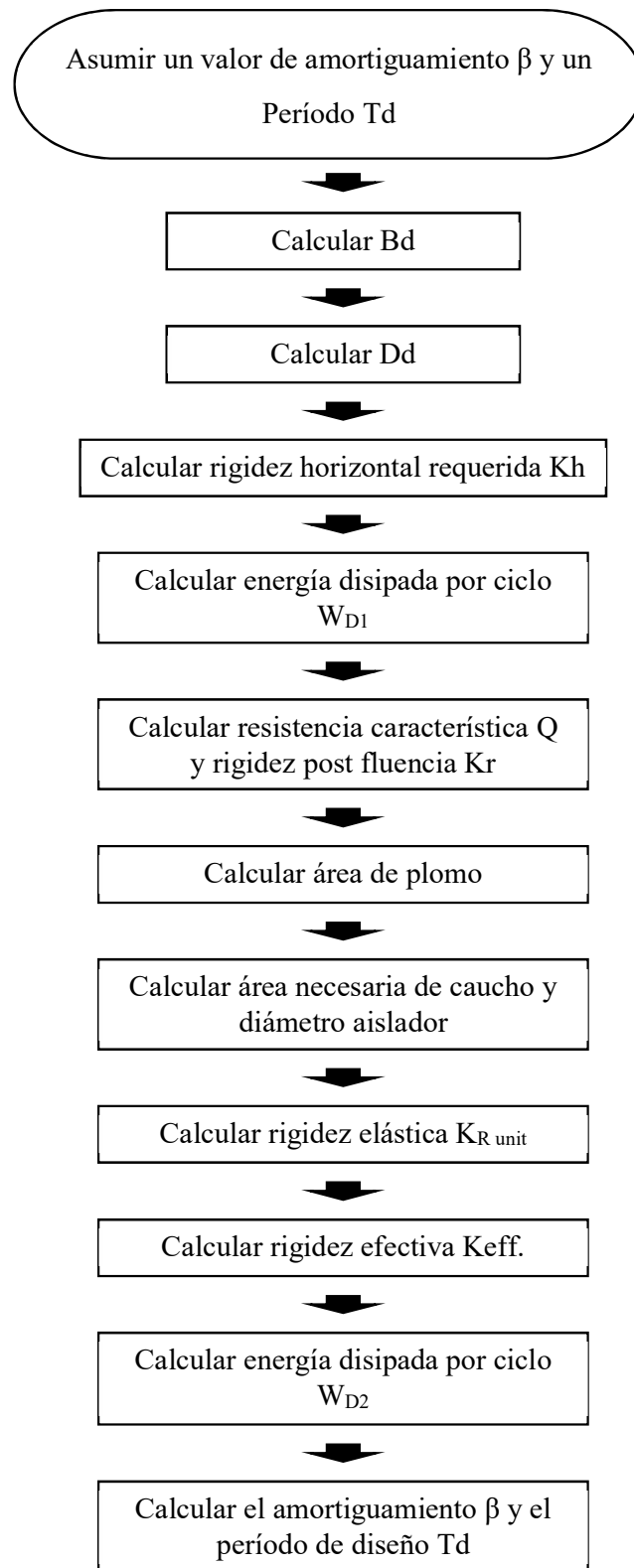
Hoy en día existen muchas empresas que se dedican a la fabricación de diversos modelos de aisladores para una amplia gama de posibilidades, dependiendo de las condiciones que se presenten. Un proveedor de este tipo de aislador es la empresa Dynamic Isolation Systems (DIS). Esta es una empresa norteamericana que se dedica al desarrollo de sistemas de protección de estructuras contra los sismos. El modelado realizado en este trabajo se basa en los productos y recomendaciones de este proveedor.

Para el cálculo se sigue los lineamientos del UBC UNIFORM BUILDING CODE del año 1997 (norma Norteamericana). El UBC del año 1997 trata los sistemas de aislamiento en la sección 1661 – “Detailed Systems Requirements”, específicamente en la sección 1661.2 “Isolation System” del Volumen 2.

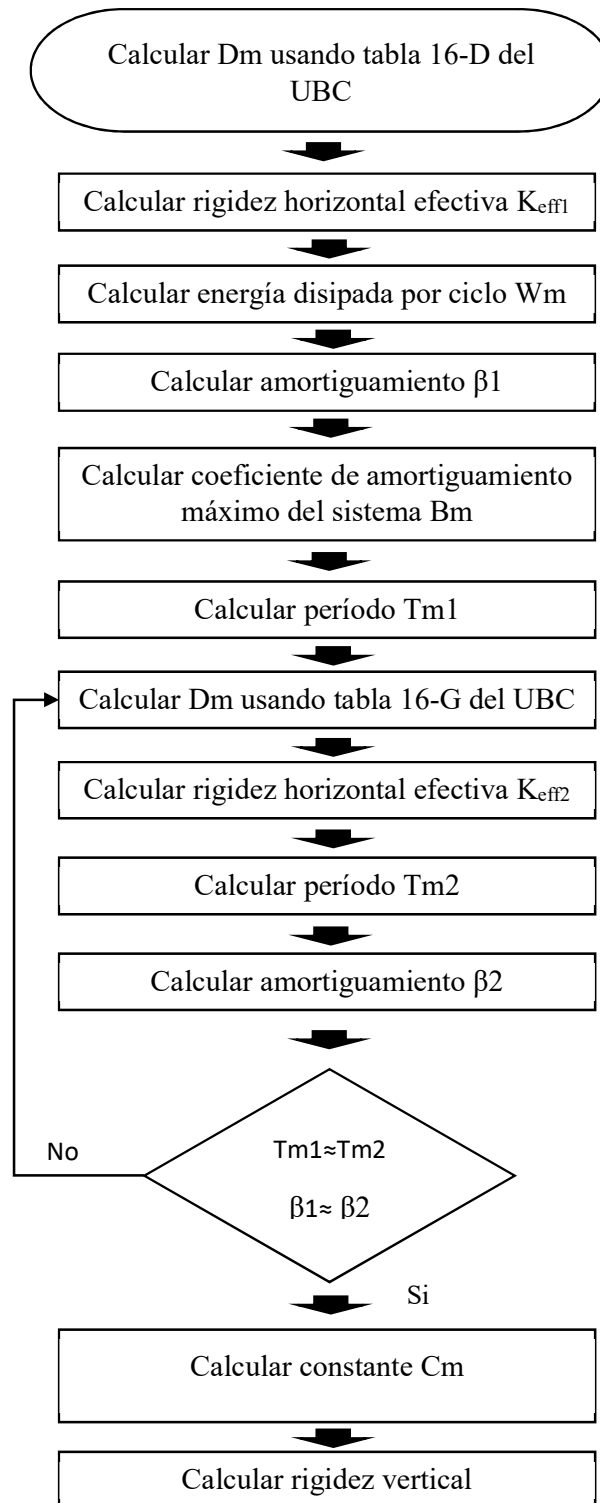
3.2. Dimensionado de los aisladores

Los aisladores se calculan para un sismo de diseño y un sismo máximo, los cuales a su vez generaran desplazamientos de diseño (D_D) y desplazamientos máximos (D_M). Se usarán los valores más desfavorables. Para las rigideces, se tomarán las menores de los dos casos de análisis.

Análisis para Sismo de Diseño



Análisis para el Máximo Sismo Esperado



Análisis para Sismo de Diseño

1) Se asume un amortiguamiento compuesto del 15% para el sistema ($\beta = 0,15$). El valor asumido es un estimado recomendado para iniciar el análisis.

$$B_D = \frac{1}{0,25 (1 - \ln 0,15)} = 1,38$$

B_D coeficiente de amortiguamiento del sistema.

2) Se asume $T_D = 2,5$ seg. El valor asumido es un estimado esperado del comportamiento del sistema.

De tabla 16-R de UBC 97. Para suelo tipo S_c y $Z=0,25 \rightarrow C_v = 0,385$.

* Z = factor de zona sísmica. En concordancia con INPRES Cirsoc 103, Z para el emplazamiento del edificio corresponde a 0.25.

Tabla 10- “Factor de zona sísmica”-Uniform Building Code 1997

SOIL PROFILE TYPE	SEISMIC ZONE FACTOR, Z				
	$Z = 0.075$	$Z = 0.15$	$Z = 0.2$	$Z = 0.3$	$Z = 0.4$
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.32N_v$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$0.40N_v$
S_C	0.13	0.25	0.32	0.45	$0.56N_v$
S_D	0.18	0.32	0.40	0.54	$0.64N_v$
S_E	0.26	0.50	0.64	0.84	$0.96N_v$
S_F	See Footnote 1				

¹Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for Soil Profile Type S_F .

$$D_D = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \cdot \frac{C_v \cdot T_D}{B_D} = \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{4\pi^2} \cdot \frac{0,385 \cdot 2,5 \text{ seg}}{1,38} = 0,17 \text{ m}$$

D_D : Es el desplazamiento de diseño, o sea, el desplazamiento del centro de rigidez del sistema de aislamiento para el sismo de diseño.

$$\text{Peso sísmico} = W = 27710 \text{ KN} = 27,71 \text{ MN}$$

El peso considerado es el peso sísmico del edificio. Es decir, el obtenido como $W=1D+0,25L$ de acuerdo a la sección 3.6 de la norma INPRES Cirsoc 103-“Acciones gravitatorias a considerar para evaluar la acción sísmica horizontal”.
Donde:

D = acción permanente.

L = sobrecarga móvil o de uso.

La rigidez requerida para un período de 2,5 seg.:

$$K_H = \frac{W}{G} \left(\frac{2\pi}{T_D} \right)^2 = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T_D} \right)^2 = \frac{27,71 \text{ MN}}{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot \left(\frac{2\pi}{2,5 \text{ s}} \right)^2 = 17,82 \frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

G = aceleración de la gravedad

Energía total disipada por ciclo W_D .

$$W_D = 2\pi \cdot K_H \cdot D^2 \cdot \beta_{eff} = 2\pi \cdot 17.82 \frac{MN}{m} (0,17 \text{ m})^2 \cdot 0,15 = 0,50 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

Parámetros Q y K_R para el núcleo de plomo

$$K_H = K_r + Q/D$$

Q = Resistencia característica. Es la fuerza a desplazamiento cero (rigidez aportada por el núcleo de plomo).

K_R = Rigidez post fluencia (rigidez aportada por el caucho).

La energía que disipa el aislador se puede tomar como el área del ciclo de histéresis del modelo bilineal.

$$W_D = 4Q \cdot (D - D_Y)$$

Siendo D_Y el desplazamiento pre-fluencia $D \gg D_Y$

$$D_Y = \frac{Q}{K_1 - K_R},$$

K_1 es la rigidez elástica, normalmente tomada como un múltiplo de K_R .

$$K_R \rightarrow K_1 = 10 \cdot K_R$$

Si se desprecia en principio D_Y , obtenemos una aproximación de Q .

$$Q = \frac{W_D}{4 \cdot D} = \frac{0,50 \text{ Mn} \cdot \text{m}}{4 \cdot 0,17 \text{ m}} = 0,73 \text{ MN}$$

$$K_R = K_H - \frac{Q}{D} = 17.82 \frac{Mn}{m} - \frac{0,73 \text{ MN}}{0,17 \text{ m}} = 13,63 \text{ MN/m}$$

Luego ajustando el valor de Q

$$D_Y = \frac{Q}{K_1 - K_R} = \frac{0,73 \text{ MN}}{9(13,63 \frac{MN}{m})} = 0,006 \text{ m}$$

$$Q = \frac{W_D}{4(D - D_Y)} = \frac{0,50 \text{ Mn} \cdot \text{m}}{4 \cdot (0,17 \text{ m} - 0,006 \text{ m})} = 0,75 \text{ MN}$$

Se toma el esfuerzo de fluencia del plomo = 10 MPa

$$A_{pb} = \frac{Q}{\sigma_y} = \frac{0,75 \text{ MN}}{10 \text{ MN/m}^2} = 0,075 \text{ m}^2 \quad \text{Área de plomo requerida}$$

$$A_{1Pb} = 0,0033 \text{ m}^2$$

Se adopta núcleo de plomo $\varnothing 70$ mm

$$A_{pb} = 23 \cdot 0,0038 m^2 = 0,885 m^2$$

$$Q = 0,885 m^2 \cdot 10 \frac{MN}{m^2} = 8,85 MN$$

Rigidez post fluencia

$$K_R = K_H - \frac{Q}{D} = 17,82 \frac{MN}{m} - \frac{0,885 MN}{0,17 m} = 12,72 MN/m$$

$$K_{R \text{ unitario}} = \frac{12,72 \frac{MN}{m}}{23} = 0,553 \frac{MN}{m}$$

Caucho a utilizar

$G = 0,7$ MPa - Módulo de cortante del elastómero de acuerdo al fabricante DIS.

Espesor del caucho 20 cm

Área de cada soporte

Se utiliza soportes de 20 capas de 10 mm c/u y 19 placas metálicas de 3mm.

$$L_r = 20 \cdot 10 \text{ mm} + 19 \cdot 3 \text{ mm} = 257 \text{ mm} = 0,257 \text{ m}$$

El espesor de la placa de anclaje según DIS es 25mm.

$$H_r = 0,257 + 2 \cdot 0,025 = 0,307 \text{ m}$$

$$A_{\text{soporte}} = \frac{L_r \cdot K_r}{G} = \frac{0,257 \text{ m} \cdot 0,553 \frac{MN}{m}}{0,7 \frac{MN}{m^2}} = 0,203 m^2$$

Área de un aislador $\varnothing 570$ mm = $0,2512 m^2$ → Se selecciona este

*Área considerada con orificio central para núcleo de plomo 70mm

$$K_{R \text{ unit}} = \frac{A \cdot G}{L_r} = \frac{0,2512 m^2 \cdot 0,7 \frac{MN}{m^2}}{0,257 m} = 0,684 \frac{MN}{m}$$

$K_{R \text{ unit}}$ = rigidez horizontal del caucho de un aislador

A = área del aislador

$$K_r = 0,684 \text{ MN/m} \times 23 = 15.737 \text{ MN/m}$$

$$K_{eff} = 15.737 \frac{\text{MN}}{\text{m}} + \frac{0,885 \text{ MN}}{0,17 \text{ m}} = 20,84 \text{ MN/m}$$

K_{eff} = Rigidez horizontal efectiva del sistema

Y la energía disipada

$$W_D = 4 \cdot 0,885 \text{ MN}(0,17 \text{ m} - 0,006 \text{ m}) = 0,59 \text{ MN.m}$$

Se calcula el amortiguamiento y el período de diseño:

$$\beta = \frac{W_D}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{0,59 \text{ MN.m}}{2 \cdot \pi \cdot 20,84 \frac{\text{MN}}{\text{m}} \cdot (0,17 \text{ m})^2} = 0,151$$

$$M = 27,71 \text{ MN} / 9,81 \text{ m/s}^2 = 2,82 \text{ MN/m/s}^2$$

M = masa del edificio.

$$T_D = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K_{eff}}{M}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{20,84 \text{ MN/m}}{2,82 \text{ MN.s}^2/\text{m}}}} = 2,31 \text{ seg}$$

Análisis para máximo sismo esperado

De tabla A-16D del UBC 97

* N_v = Factor de fuente cercana. Se relaciona con la proximidad del edificio a fallas conocidas. De acuerdo a INPRES Cirsoc 103, corresponde $N_v = 1,2$.

$$Z = 0.25 \quad \rightarrow \quad Z \cdot N_v = 0.25 \cdot 1.2 = 0.3 \quad \rightarrow \quad M_m = 1.5$$

Tabla 11- “Coeficiente de respuesta sísmica máxima capaz”-Uniform Building Code 1997

TABLE A-16-D—MAXIMUM CAPABLE EARTHQUAKE RESPONSE COEFFICIENT, M_M

DESIGN BASIS EARTHQUAKE SHAKING INTENSITY, Z_N	MAXIMUM CAPABLE EARTHQUAKE RESPONSE COEFFICIENT, M_M
0.075	2.67
0.15	2.0
0.20	1.75
0.30	1.50
0.40	1.25
≥ 0.50	1.20

D_M : Es el desplazamiento del centro de rigidez del sistema de aislamiento para el máximo sismo esperado.

Para el D_M asumimos

$$D_M = 1,5 D_D = 1,5 \cdot 0,17 \text{ m} = 0,26 \text{ m}$$

$$K_{eff1} = 15.737 \frac{MN}{m} + \frac{0,885 MN}{0,26 \text{ m}} = 19,14 MN/m$$

K_{eff} = Rigidez horizontal efectiva del sistema

La energía total disipada por ciclo es:

$$W_M = 4Q \cdot (D_M - D_Y)$$

$$D_Y = \frac{Q}{9 \cdot K_r} = \frac{0,885 MN}{9 \cdot 15.737 MN/m} = 0,006 \text{ m}$$

$$W_M = 4 \cdot 0,885 MN \cdot (0,26 \text{ m} - 0,006 \text{ m}) = 0,9 MN \cdot m$$

$$\beta = \frac{W_M}{2\pi \cdot K_{eff} \cdot D_M^2} = \frac{0,9 MN \cdot m}{2\pi \cdot 19,14 \frac{MN}{m} \cdot (0,26 \text{ m})^2} = 0,101 \rightarrow 10,1\%$$

B_M coeficiente de amortiguamiento del sistema.

$$B_M = \frac{1}{0,25 (1 - \ln 0,101)} = 1,25$$

$$T_M = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K_{eff}}{M}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{19,14 MN/m}{2,82 MN \cdot s^2/m}}} = 2,41 \text{ seg}$$

$$D_M = \frac{\frac{g}{4\pi^2} \cdot C_{VM} \cdot T_{VM}}{B_M}$$

De la table A-16 – G del UBC 97:

$$\text{Suelo tipo Sc} \quad \wedge \quad M_m \cdot Z \cdot N_v = 1.5 \cdot 0.25 \cdot 1.2 = 0.45 \rightarrow C_{VM} = 1.4 \cdot 0.45 = 0.63$$

Tabla 12- “Intensidad máxima de sacudida sísmica capaz”-Uniform Building Code 1997

TABLE A-16-G—SEISMIC COEFFICIENT, C_{VM} ¹

SOIL PROFILE TYPE	MAXIMUM CAPABLE EARTHQUAKE SHAKING INTENSITY $M_M Z N_v$				
	$M_M Z N_v = 0.075$	$M_M Z N_v = 0.15$	$M_M Z N_v = 0.20$	$M_M Z N_v = 0.30$	$M_M Z N_v \geq 0.40$
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.8 M_M Z N_v$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$1.0 M_M Z N_v$
S_C	0.13	0.25	0.32	0.45	$1.4 M_M Z N_v$
S_D	0.18	0.32	0.40	0.54	$1.6 M_M Z N_v$
S_E	0.26	0.50	0.64	0.84	$2.4 M_M Z N_v$
S_F	See Footnote 2				

¹Linear Interpolation may be used to determine the value of C_{VM} for values of $M_M Z N_v$ for other than those shown in the table.

²Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for soil.

$$D_M = \frac{\frac{9,81 \frac{m}{s^2}}{4\pi^2} \cdot 0,63 \cdot 2,41 \text{ seg}}{1,25} = 0,30 \text{ m}$$

$$K_{eff2} = 15.737 \frac{MN}{m} + \frac{0.885 MN}{0,30 m} = 18,66 MN/m$$

$$T_M = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K_{eff}}{M}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{18,66 MN/m}{2,82 MN \cdot s^2/m}}} = 2,44 \text{ seg}$$

$$W_M = 4 \cdot 0,885 MN \cdot (0,30 m - 0,006 m) = 1,05 MN \cdot m$$

$$\beta = \frac{W_M}{2\pi \cdot K_{eff} \cdot D^2} = \frac{1,05 MN \cdot m}{2\pi \cdot 18,66 \frac{MN}{m} \cdot (0,30 m)^2} = 0,098 \rightarrow 9,8\%$$

Cálculo del amortiguamiento efectivo (“Effective Damping”)

$$C = \frac{W_M}{\frac{2\pi^2 \cdot D^2}{T}}$$

$$C_M = \frac{1,05 \text{ MN}\cdot\text{m}}{\frac{2\pi^2 \cdot (0,30\text{m})^2}{2,44 \text{ seg}}} = 1,42 \text{ MN}\cdot\text{seg}/\text{m}$$

Rigidez vertical

$$K_v = \frac{E_c \cdot A_c}{L_r} + \frac{E_{pb} \cdot A_{pb}}{L_r}$$

Donde:

E_c =Módulo de compresión instantáneo del compuesto elastómero-acero

A =Sección de la lámina de acero

L_r =Altura total de goma del aislador

El módulo de compresión instantáneo para el aislador con núcleo de plomo es:

$$\frac{1}{E_c} = \left(\frac{1}{6G \cdot S^2} + \frac{4}{3K} \right)$$

Donde:

K = Módulo de elasticidad del caucho. El fabricante DIS proporciona el valor

$K=2000\text{MPa}$.

S = Factor de formas: Relación de aspecto geométrico que involucra el área de elastómero que se encuentra cargado respecto del área de elastómero libre de carga.

$$S = \frac{\text{area cargada}}{\text{Area huec interno}} = \frac{\frac{\pi}{4}((0,57\text{m})^2 - (0,07\text{m})^2)}{\frac{\pi}{4}(0,07\text{m})^2} = 65,3$$

$$E_c = \left(\frac{1}{6 \cdot 0,7 \text{ M} / \text{m}^2 \cdot 65,3^2} + \frac{4}{3 \cdot 2000 \text{ MN} / \text{m}^2} \right)^{-1} = 1384 \text{ MN}/\text{m}$$

$$K_v = \frac{1384 \text{ MN/m}^2 * 0.25^2}{0.257 \text{ m}} + \frac{18000 \text{ MN/m}^2 * 0.00385 \text{ m}^2}{0.257 \text{ m}} = 1622.4 \text{ MN/m}$$

R” = Factor de reducción. Análogo al factor R que se usa para las estructuras sin aislamiento. Normalmente el factor R” debe estar entre 1 y 2.

$$R'' = \frac{2}{3} R = \frac{2}{3} * 5 = 3.33$$

Valores finales para modelado

K_v=1622400 KN/m	“effective stiffness”-rigidez efectiva vertical
C=61.7 KN.seg/m	“effective damping”-amortiguamiento efectivo
K_{eff}=811.3 KN/m	“effective stiffness”-rigidez efectiva horizontal
H/2=0.1535 m	“distance from end J” – mitad de la altura del aislador
K_e= 6842 KN/m	“stiffness”-rigidez
F_y=684 KN	“yield strength” – fuerza de fluencia
R=0.1	“post yield stiffness ratio”- relación de rigidez posterior a la fluencia

3.3. Modelado del aislador en Sap2000

Los aisladores se ubican por debajo del subsuelo, en la unión de la superestructura con las bases del edificio. No se modifica la estructura original del edificio, simplemente se modifica su vinculación al terreno.

Los aisladores se modelan como elementos tipo “link” con los coeficientes calculados. Se considera comportamiento lineal en la dirección Z y comportamiento no lineal en las direcciones X e Y.

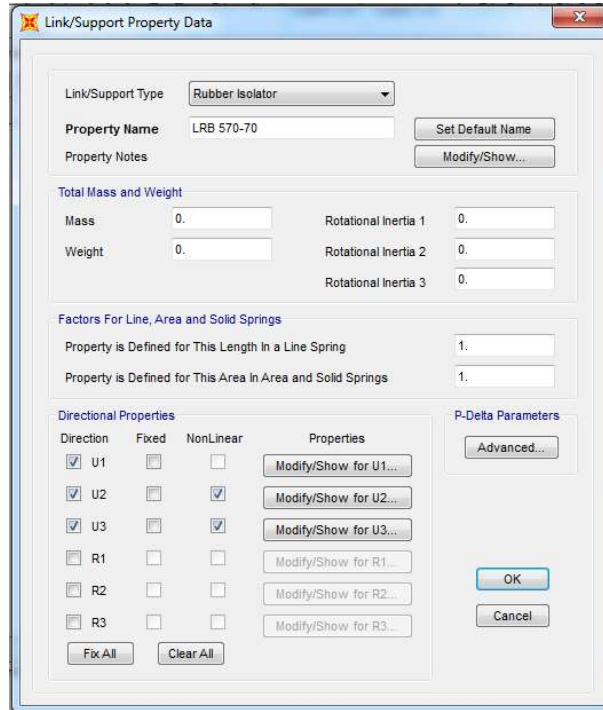


Fig. N° 21 - Cuadro de diálogo Sap2000 “Definición de elemento tipo link”

En dirección U1 (Z)

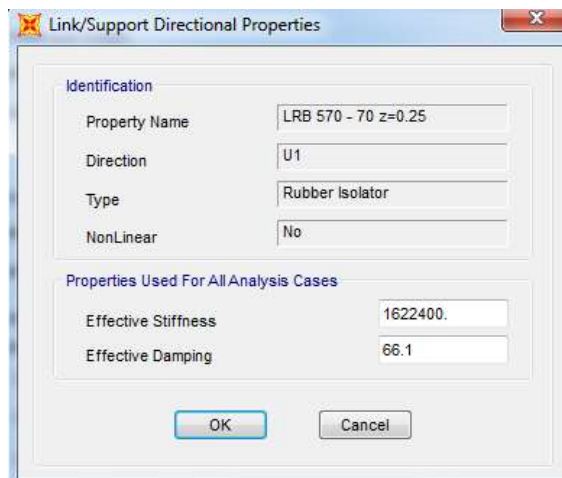


Fig. N° 22 - Cuadro de diálogo Sap2000 “Propiedades direccionales en Z”

En dirección U2 y U3 (X e Y)

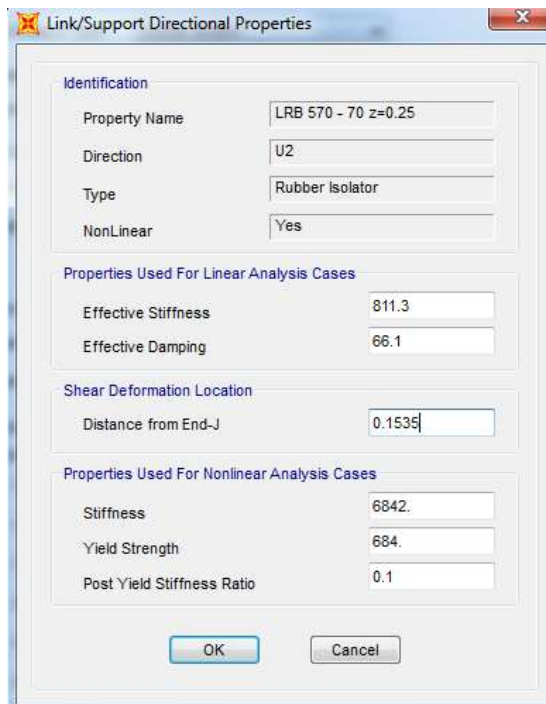


Fig. N° 23 - Cuadro de diálogo Sap2000 “Propiedades direccionales en X e Y”

4. Análisis de las Respuestas del Edificio

4.1. Caso 1. Edificio sin aislación de base

Períodos

Tabla 13 – Períodos y frecuencias de vibración

Modo	Periodo	Frecuencia
	Seg	Hz
1	1.47	0.68
2	1.28	0.78
3	1.15	0.87
4	0.51	1.97
5	0.46	2.17
6	0.43	2.31
7	0.29	3.40
8	0.28	3.61
9	0.25	3.96
10	0.23	4.32
11	0.23	4.38
12	0.21	4.67
13	0.18	5.71
14	0.16	6.19

Respuesta en la dirección X

Para este caso se aplica el espectro según la dirección X.

Desplazamientos

El desplazamiento máximo que se presenta en la estructura para el espectro según la dirección x es de 5.62 cm.

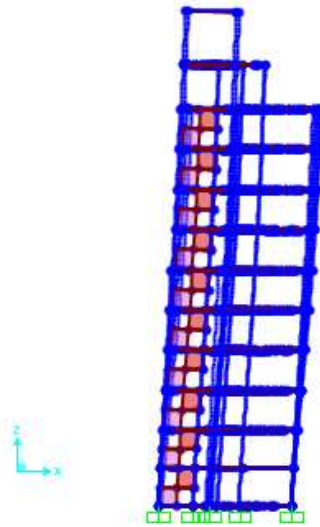


Fig. N° 24 - Estructura desplazada – Espectro según X sin aislamiento

Se verifican los desplazamientos horizontales en la Azotea para los nudos de columnas 1-2-3-4-5-6-16-18-25.

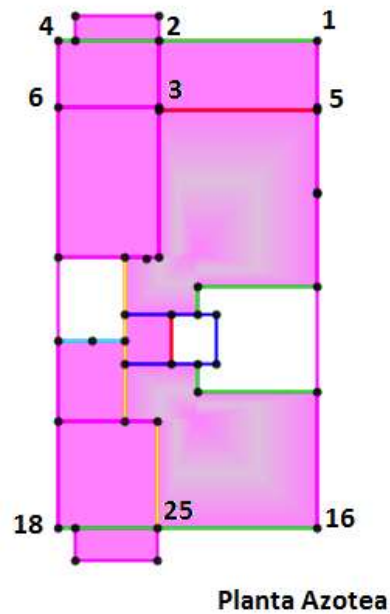


Fig. N° 25 - Planta azotea con referencia de puntos

Tabla 14 – Desplazamientos absolutos en azotea – Análisis en X

Puntos	Planta	Desp absoluto (cm)
1	Azotea	5.62
2	Azotea	5.62
3	Azotea	5.25
4	Azotea	5.62
5	Azotea	5.24
6	Azotea	5.25
16	Azotea	3.51
18	Azotea	3.51
25	Azotea	3.51

Desplazamientos relativos por planta

Se toma el pilar 4 para el análisis del desplazamiento relativo nivel por nivel.

Tabla 15- Desplazamientos por nivel de pilar 4 – Análisis en X

Planta	Pilar	Desp Absoluto (cm)	Desp Relativo (cm)
Azotea	4	5.62	0.26
8	4	5.36	0.36
7	4	4.99	0.46
6	4	4.53	0.55
5	4	3.98	0.63
4	4	3.35	0.69
3	4	2.66	0.73
2	4	1.93	0.76
1	4	1.17	0.72
Planta Baja	4	0.44	0.44
Subsuelo	4	0.00	0.00

*El desplazamiento relativo representa el desplazamiento de un punto del pilar con respecto al mismo punto del nivel de piso inmediatamente inferior.

Esfuerzos en bases de los pilares para espectro según X

Tabla 16 – Esfuerzos en la base de los pilares – Análisis en X

Pilar	Caso	Cortante (KN)	Axil (KN)	Momento (KN.m)
1	Sx	53.86	206.44	115.65
2	Sx	103.72	322.83	158.97
3	Sx	82.45	336.21	136.32
4	Sx	87.53	493.74	117.07
5	Sx	60.30	209.27	117.50
6	Sx	67.98	652.88	123.80
16	Sx	37.73	156.68	76.31
18	Sx	41.01	325.34	79.14
25	Sx	72.93	141.38	113.10

Cortante basal

El cortante basal obtenido de los resultados de análisis en el programa es 1274 KN, el cual es calculado como la suma de los cortantes en la base de cada uno de los 23 pilares.

*El corte basal expresado representa la suma algebraica de los esfuerzos de corte en la base de los pilares (en la unión base pilar) generados por el espectro en la dirección X.

Respuesta en la dirección Y

Para este caso se aplica el espectro según la dirección Y.

Desplazamientos

El desplazamiento máximo que se presenta en la estructura para el espectro según la dirección Y es de 4.18 cm.

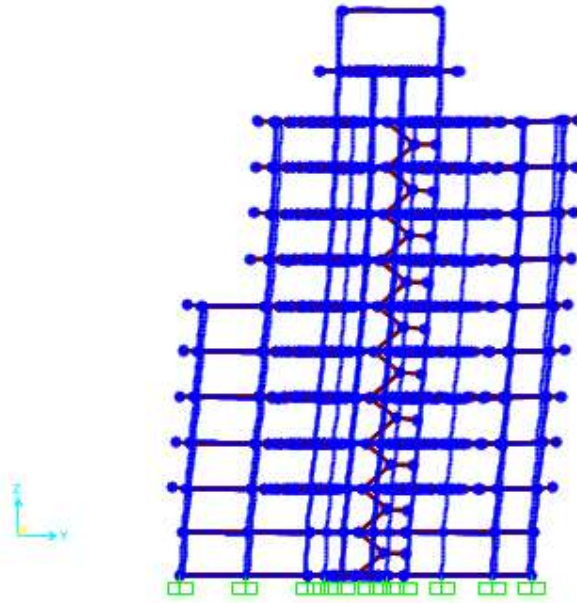
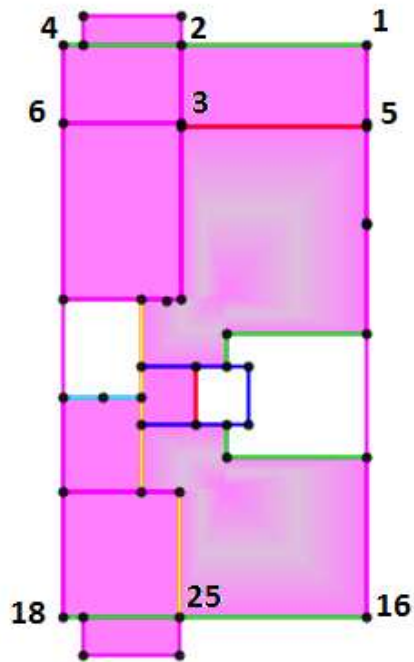


Fig. N° 26 - Estructura desplazada - Espectro según Y sin aislamiento

Se verifican los desplazamientos horizontales en la Azotea para los nudos de columnas 1-2-3-4-5-6-16-18-25.



Planta Azotea

Fig. N° 27 - Planta azotea con referencia de puntos

Tabla 17 - Desplazamientos absolutos en azotea – Análisis en Y

Puntos	Planta	Desp absoluto (cm)
1	Azotea	3.65
2	Azotea	3.95
3	Azotea	3.95
4	Azotea	4.18
6	Azotea	3.65
5	Azotea	4.18
16	Azotea	3.65
18	Azotea	4.18
25	Azotea	3.95

Desplazamientos relativos por planta

Se toma el pilar 4 para el análisis del desplazamiento relativo nivel por nivel.

Tabla 18- Desplazamientos por nivel de pilar 4 – Análisis en Y

Planta	Pilar	Desp Absoluto (cm)	Desp Relativo (cm)
Azotea	4	4.18	0.22
8	4	3.96	0.30
7	4	3.65	0.38
6	4	3.27	0.43
5	4	2.85	0.44
4	4	2.41	0.49
3	4	1.92	0.53
2	4	1.39	0.56
1	4	0.83	0.52
Planta Baja	4	0.31	0.31
Subsuelo	4	0.00	0.00

Esfuerzos en bases de los pilares para espectro según Y

Tabla 19 – Esfuerzos en la base de los pilares – Análisis en Y

Punto	Caso	Cortante (KN)	Axil (KN)	Momento (KN.m)
1	Sy	65.12	547.29	48.20
2	Sy	56.94	661.63	95.96
3	Sy	96.86	277.51	169.94
4	Sy	50.69	515.59	92.87
5	Sy	81.34	37.01	147.33
6	Sy	87.23	333.83	166.67
16	Sy	61.60	304.22	78.78
18	Sy	66.78	190.14	122.14
25	Sy	47.50	392.50	87.89

Cortante basal

El cortante basal obtenido de los resultados de análisis en el programa es 1490 KN, el cual se calcula como la suma de los cortantes en de cada uno de los 23 pilares en su punto de arranque del subsuelo, unión con las bases.

4.2. Caso 2. Edificio con aislamiento de base

Períodos

Tabla 20 – Períodos y frecuencias de vibración

Modo	Periodo (seg)	Frecuencia (Hz)
1	2.81	0.36
2	2.71	0.37
3	2.51	0.40
4	0.78	1.29
5	0.70	1.42
6	0.65	1.54
7	0.39	2.54
8	0.37	2.73
9	0.34	2.91
10	0.27	3.72
11	0.26	3.85
12	0.24	4.17
13	0.22	4.63
14	0.21	4.76

Espectro según X

Desplazamientos

El desplazamiento máximo que se presenta en la estructura para el espectro según la dirección X es de 9.68 cm.

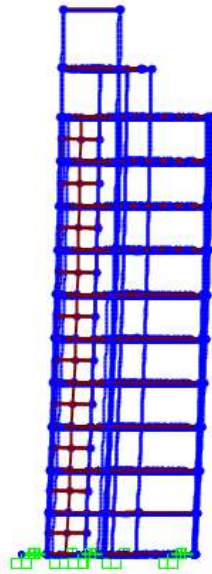


Fig. N° 28 - Estructura desplazada - Espectro según X con aislador de base

Se verifican los desplazamientos horizontales en la Azotea para los nudos de columnas 1-2-3-4-5-6-16-18-25.

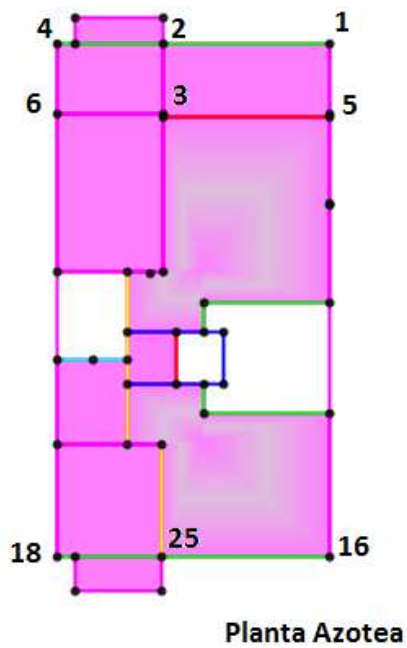


Fig. N° 29 - Planta azotea con referencia de puntos

Tabla 21 - Desplazamientos absolutos en azotea – Análisis en X

Puntos	Planta	Desp absoluto (cm)
1	Azotea	9.68
2	Azotea	9.68
3	Azotea	9.47
4	Azotea	9.68
5	Azotea	9.46
6	Azotea	9.47
16	Azotea	8.41
18	Azotea	8.41
25	Azotea	8.41

Desplazamientos relativos por planta

Se toma el pilar 4 para el análisis del desplazamiento relativo nivel por nivel.

Tabla 22- Desplazamientos por nivel de pilar 4 – Análisis en X

Planta	Pilar	Desp Absoluto (cm)	Desp Relativo (cm)
Azotea	4	9.68	0.15
8	4	9.53	0.20
7	4	9.33	0.25
6	4	9.08	0.31
5	4	8.77	0.36
4	4	8.41	0.40
3	4	8.01	0.44
2	4	7.57	0.47
1	4	7.10	0.49
Planta Baja	4	6.61	0.42
Subsuelo	4	6.20	6.20

Esfuerzos en bases de los pilares para espectro según X

Tabla 23 – Esfuerzos en la base de los pilares – Análisis en X

Pilar	Caso	Cortante (KN)	Axil (KN)	Momento (KN.m)
1	Sx	50.75	149.43	7.79
2	Sx	50.79	208.92	7.80
3	Sx	49.80	201.92	7.64
4	Sx	50.79	375.54	7.80
5	Sx	49.76	158.22	7.64
6	Sx	49.78	403.95	7.64
16	Sx	44.77	140.91	6.87
18	Sx	44.78	286.52	6.87
25	Sx	44.80	147.76	6.88

Espectro según Y**Desplazamientos**

El desplazamiento máximo que se presenta en la estructura para el espectro según la dirección Y es de 8.40 cm.

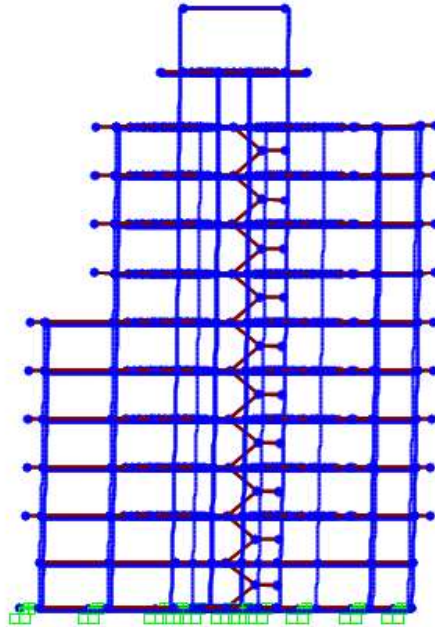


Fig. N° 30 - Estructura desplazada - Espectro según Y con aislador de base

Se verifican los desplazamientos horizontales en la Azotea para los nudos de columnas 1-2-3-4-5-6-16-18-25.

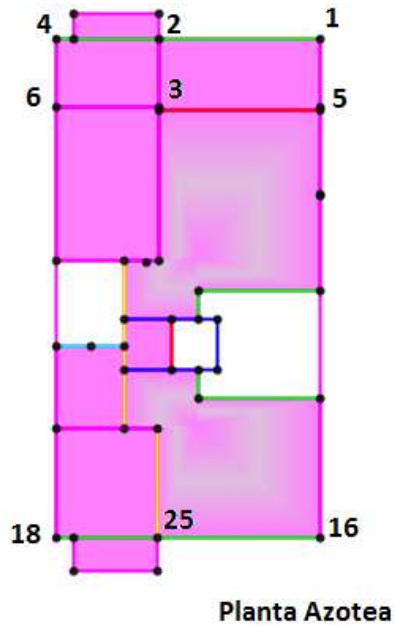


Fig. N°31 - Planta azotea con referencia de puntos

Tabla 24 - Desplazamientos absolutos en azotea – Análisis en Y

Puntos	Planta	Desp absoluto (cm)
1	Azotea	8.15
2	Azotea	8.30
3	Azotea	8.30
4	Azotea	8.40
6	Azotea	8.15
5	Azotea	8.40
16	Azotea	8.15
18	Azotea	8.40
25	Azotea	8.30

Desplazamientos relativos por planta

Se toma el pilar 4 para el análisis del desplazamiento relativo nivel por nivel.

Tabla 25- Desplazamientos por nivel de pilar 4 – Análisis en Y

Planta	Pilar	Desp Absoluto (cm)	Desp Relativo (cm)
Azotea	4	8.40	0.11
8	4	8.29	0.15
7	4	8.14	0.19
6	4	7.95	0.22
5	4	7.73	0.24
4	4	7.50	0.27
3	4	7.23	0.31
2	4	6.92	0.34
1	4	6.58	0.34
Planta Baja	4	6.24	0.30
Subsuelo	4	5.94	5.94

Esfuerzos en bases de los pilares para espectro según Y

Tabla 26 – Esfuerzos en la base de los pilares – Análisis en Y

Punto	Caso	Cortante (KN)	Axil (KN)	Momento (KN.m)
1	Sy	47.92	378.34	7.36
2	Sy	48.37	408.52	7.42
3	Sy	48.36	154.08	7.42
4	Sy	48.67	316.62	7.47
5	Sy	47.91	38.93	7.35
6	Sy	48.67	179.41	7.47
16	Sy	47.88	204.35	7.35
18	Sy	48.67	169.00	7.47
25	Sy	48.35	227.56	7.42

4.3. Comparación de resultados - Estructura con y sin aisladores**Respuesta en la dirección X**

Para este caso se aplica el espectro según la dirección X.

Se compara los desplazamientos horizontales en la Azotea para los nudos de columnas 1-2-3-4-5-6-16-18-25.

Tabla 27- Comparación desplazamientos relativos de azotea – Análisis en X

Puntos	Planta	Desp relativo desde Subsuelo a Azotea*		Diferencia
		Sin aislador	Con aislador	
1	Azotea	5.62	3.49	2.13
2	Azotea	5.62	3.49	2.13
3	Azotea	5.25	3.27	1.98
4	Azotea	5.62	3.49	2.13
5	Azotea	5.24	3.26	1.97
6	Azotea	5.25	3.27	1.98
16	Azotea	3.51	2.21	1.30
18	Azotea	3.51	2.21	1.30
25	Azotea	3.51	2.21	1.30

*Sobre nivel de aisladores-se descuenta el desplazamiento del aislador

Puede observarse que hay una disminución de más del 30% del desplazamiento relativo entre los puntos de la azotea y el subsuelo sobre los aisladores de base. Esto se debe al desacoplamiento de la estructura del suelo, es decir, es el aislador el que absorbe el movimiento y solo transmite una parte de este a la estructura.

Desplazamientos relativos por planta

Se compara los desplazamientos del pilar 4 nivel por nivel.

Tabla 28 – Comparación desplazamientos pilar 4 por nivel – Análisis en X

Planta	Pilar	Sin aislador		Con aislador		Observacion
		Desp Absoluto (cm)	Desp Relativo (cm)	Desp Absoluto (cm)	Desp Relativo (cm)	
Azotea	4	5.62	0.26	9.68	0.15	Reduce el desp relativo
8	4	5.36	0.36	9.53	0.20	Reduce el desp relativo
7	4	4.99	0.46	9.33	0.25	Reduce el desp relativo
6	4	4.53	0.55	9.08	0.31	Reduce el desp relativo
5	4	3.98	0.63	8.77	0.36	Reduce el desp relativo
4	4	3.35	0.69	8.41	0.40	Reduce el desp relativo
3	4	2.66	0.73	8.01	0.44	Reduce el desp relativo
2	4	1.93	0.76	7.57	0.47	Reduce el desp relativo
1	4	1.17	0.72	7.10	0.49	Reduce el desp relativo
Planta Baja	4	0.44	0.44	6.61	0.42	Reduce el desp relativo
Subsuelo	4	0.00	0.00	6.20	6.20	Aumenta el desp relativo

La disminución del desplazamiento que se observa en la estructura entera, se puede ver al realizar el análisis nivel por nivel. Se ve también que cambia la

forma de la deformada en cada caso, notando el gran desplazamiento del aislador que hace disminuir los desplazamientos relativos en cada nivel y consecuentemente los esfuerzos a los que estará sometida la estructura.

Esfuerzos en bases de los pilares para espectro según X

Tabla 29 – Comparación de cortantes en la base - Análisis en X

Pilar	Caso	Sin aislador	Con aislador	Diferencia
		Cortante (KN)	Cortante (KN)	Cortante (KN)
1	Sx	53.86	50.75	3.11
2	Sx	103.72	50.79	52.93
3	Sx	82.45	49.80	32.65
4	Sx	87.53	50.79	36.74
5	Sx	60.30	49.76	10.54
6	Sx	67.98	49.78	18.20
16	Sx	37.73	44.77	-7.04
18	Sx	41.01	44.78	-3.77
25	Sx	72.93	44.80	28.13

Se puede observar en este cuadro una disminución de los esfuerzos cortantes. Esto se debe a que los aisladores solo pueden transmitir una cierta cantidad de este esfuerzo.

Tabla 30 – Comparación de axiles en la base - Análisis en X

Pilar	Caso	Sin aislador	Con aislador	Diferencia
		Axil (KN)	Axil (KN)	Axil (KN)
1	Sx	206.44	149.43	57.01
2	Sx	322.83	208.92	113.91
3	Sx	336.21	201.92	134.29
4	Sx	493.74	375.54	118.20
5	Sx	209.27	158.22	51.05
6	Sx	652.88	403.95	248.94
16	Sx	156.68	140.91	15.77
18	Sx	325.34	286.52	38.82
25	Sx	141.38	147.76	-6.38

Los esfuerzos axiales disminuyen en el caso sísmico Sx debido al desacoplamiento del aislador que evita las sobrecargas sobre ciertos puntos al transmitir el sismo el movimiento.

Tabla 31- Comparación de momentos en la base - Análisis en X

Pilar	Caso	Sin aislador	Con aislador	Diferencia
		Momento (KN.m)	Momento (KN.m)	Momento (KN.m)
1	Sx	115.65	7.79	107.86
2	Sx	158.97	7.80	151.17
3	Sx	136.32	7.64	128.68
4	Sx	117.07	7.80	109.27
5	Sx	117.50	7.64	109.86
6	Sx	123.80	7.64	116.16
16	Sx	76.31	6.87	69.44
18	Sx	79.14	6.87	72.26
25	Sx	113.10	6.88	106.22

Los esfuerzos de momento también disminuyen debido a la limitación de transmisión de los aisladores.

Respuesta en la dirección Y

Para este caso se aplica el espectro según la dirección Y.

Se puede observar que el análisis de este caso sísmico Sy nos lleva a las mismas conclusiones que el caso Sx para cada uno de los puntos en cuestión.

Se compara los desplazamientos horizontales en la Azotea para los nudos de columnas 1-2-3-4-5-6-16-18-25.

Tabla 32- Comparación desplazamientos relativos de azotea – Análisis en Y

Puntos	Planta	Desp relativo desde Subsuelo a Azotea		Diferencia
		Sin aislador	Con aislador	
1	Azotea	3.65	2.21	1.44
2	Azotea	3.95	2.36	1.59
3	Azotea	3.95	2.36	1.59
4	Azotea	4.18	2.46	1.71
5	Azotea	3.65	2.21	1.44
6	Azotea	4.18	2.46	1.71
16	Azotea	3.65	2.21	1.44
18	Azotea	4.18	2.46	1.71
25	Azotea	3.95	2.36	1.59

*Sobre nivel de aisladores-se descuenta el desplazamiento del aislador

Desplazamientos relativos por planta

Se compara los desplazamientos del pilar 4 nivel por nivel.

Tabla 33 – Comparación desplazamientos pilar 4 por nivel – Análisis en Y

Planta	Pilar	Sin aislador		Con aislador		Observacion
		Desp Absoluto (cm)	Desp Relativo (cm)	Desp Absoluto (cm)	Desp Relativo (cm)	
Azotea	4	4.18	0.22	8.40	0.11	Reduce el desp relativo
8	4	3.96	0.30	8.29	0.15	Reduce el desp relativo
7	4	3.65	0.38	8.14	0.19	Reduce el desp relativo
6	4	3.27	0.43	7.95	0.22	Reduce el desp relativo
5	4	2.85	0.44	7.73	0.24	Reduce el desp relativo
4	4	2.41	0.49	7.50	0.27	Reduce el desp relativo
3	4	1.92	0.53	7.23	0.31	Reduce el desp relativo
2	4	1.39	0.56	6.92	0.34	Reduce el desp relativo
1	4	0.83	0.52	6.58	0.34	Reduce el desp relativo
Planta Baja	4	0.31	0.31	6.24	0.30	Reduce el desp relativo
Subsuelo	4	0.00	0.00	5.94	5.94	Aumenta el desp relativo

Esfuerzos en bases de los pilares para espectro según Y

Tabla 34 – Comparación de cortantes en la base - Análisis en Y

Pilar	Caso	Sin aislador	Con aislador	Diferencia
		Cortante (KN)	Cortante (KN)	Cortante (KN)
1	Sy	65.12	47.92	17.21
2	Sy	56.94	48.37	8.58
3	Sy	96.86	48.36	48.50
4	Sy	50.69	48.67	2.02
5	Sy	81.34	47.91	33.43
6	Sy	87.23	48.67	38.56
16	Sy	61.60	47.88	13.72
18	Sy	66.78	48.67	18.11
25	Sy	47.50	48.35	-0.85

Tabla 35 – Comparación de axiles en la base - Análisis en Y

Pilar	Caso	Sin aislador	Con aislador	Diferencia
		Axil (KN)	Axil (KN)	Axil (KN)
1	Sy	547.29	378.34	168.95
2	Sy	661.63	408.52	253.11
3	Sy	277.51	154.08	123.43
4	Sy	515.59	316.62	198.97
5	Sy	37.01	38.93	-1.92
6	Sy	333.83	179.41	154.43
16	Sy	304.22	204.35	99.87
18	Sy	190.14	169.00	21.15
25	Sy	392.50	227.56	164.94

Tabla 36- Comparación de momentos en la base - Análisis en Y

Pilar	Caso	Sin aislador	Con aislador	Diferencia
		Momento (KN.m)	Momento (KN.m)	Momento (KN.m)
1	Sy	48.20	7.36	40.85
2	Sy	95.96	7.42	88.54
3	Sy	169.94	7.42	162.51
4	Sy	92.87	7.47	85.40
5	Sy	147.33	7.35	139.98
6	Sy	166.67	7.47	159.20
16	Sy	78.78	7.35	71.43
18	Sy	122.14	7.47	114.67
25	Sy	87.89	7.42	80.47

Tabla 37 – Comparación de corte basal

Corte Basal			
Dirección X	Caso Sx		
Sin Aislador	Con Aislador	Diferencia	Porcentual
KN	KN	KN	
1274	1076	198	16%
Dirección Y	Caso Sy		
Sin Aislador	Con Aislador	Diferencia	Porcentual
KN	KN	KN	
1490	1102	388	26%

Al igual que en el análisis de algunos puntos, se tiene una disminución del corte basal en el caso con aislación de base. Como se comenta anteriormente, esta se debe a que el aislador solo puede transmitir una cierta cantidad de esfuerzo tangencial, el cual es menor que el que transmite la columna empotrada a la base.

5. Análisis de rigideces de piso

5.1. Análisis de rigidez sin aislador

Análisis en X

Caso Sismo en X (Sx)

Tabla 38 – Cálculo de rigidez de piso – Análisis en X sin aislación

Nivel	Desp absol	Desp relativo	Corte	Rigidez
	Cm	Cm	KN	KN/cm
Azotea	5.62	0.26	140	537.02
Piso 8	5.36	0.36	340	933.81
Piso 7	4.99	0.46	522	1126.46
Piso 6	4.53	0.55	665	1203.84
Piso 5	3.98	0.63	778	1239.84
Piso 4	3.35	0.69	882	1281.79
Piso 3	2.66	0.73	981	1336.15
Piso 2	1.93	0.76	1079	1420.67
Piso 1	1.17	0.72	1168	1614.82
Planta Baja	0.44	0.44	1241	2796.30
Subsuelo	0.00	0.00	1274	

Análisis en Y

Caso Sismo en Y (Sy)

Tabla 39 – Cálculo de rigidez de piso – Análisis en Y sin aislación

Nivel	Desp absol	Desp relativo	Corte	Rigidez
	Cm	Cm	KN	KN/cm
Azotea	4.18	0.22	140	636.36
Piso 8	3.96	0.30	363	1197.62
Piso 7	3.65	0.38	576	1518.99
Piso 6	3.27	0.43	750	1754.80
Piso 5	2.85	0.44	892	2042.59
Piso 4	2.41	0.49	1038	2125.31
Piso 3	1.92	0.53	1171	2201.96
Piso 2	1.39	0.56	1289	2312.94
Piso 1	0.83	0.52	1389	2678.88
Planta Baja	0.31	0.31	1460	4639.34
Subsuelo	0.00	0.00	1490	

5.2. Análisis de rigidez con aislador

Análisis en X

Caso Sismo en X (S_x)

Tabla 40 – Cálculo de rigidez de piso – Análisis en X con aislación

Nivel	Desp absol	Desp relativo	Corte	Rigidez
	Cm	Cm	KN	KN/cm
Azotea	9.68	0.15	53	354.52
Piso 8	9.53	0.20	163	808.93
Piso 7	9.33	0.25	273	1074.38
Piso 6	9.08	0.31	374	1220.63
Piso 5	8.77	0.36	467	1297.58
Piso 4	8.41	0.40	567	1411.85
Piso 3	8.01	0.44	663	1511.97
Piso 2	7.57	0.47	753	1600.77
Piso 1	7.10	0.49	839	1721.38
Planta Baja	6.61	0.42	923	2204.97
Subsuelo	6.20	3.76	1076	

Análisis en Y

Caso Sismo en Y (S_y)

Tabla 41 – Cálculo de rigidez de piso – Análisis en Y con aislación

Nivel	Desp absol	Desp relativo	Corte	Rigidez
	Cm	Cm	KN	KN/cm
Azotea	8.40	0.11	50	469.48
Piso 8	8.29	0.15	157	1063.69
Piso 7	8.14	0.19	265	1403.60
Piso 6	7.95	0.22	367	1666.67
Piso 5	7.73	0.24	461	1953.39
Piso 4	7.50	0.27	565	2072.63
Piso 3	7.23	0.31	664	2157.95
Piso 2	6.92	0.34	759	2246.23
Piso 1	6.58	0.34	850	2481.03
Planta Baja	6.24	0.30	939	3105.16
Subsuelo	5.94		1102	

5.3. Comparación de rigideces

Análisis en X

Caso Sismo en X (Sx)

Tabla 42 – Comparación de rigideces de piso – Análisis en X

Nivel	Rigideces		Diferencia	Porcentual
	Sin aislador	Con aislador		
	KN/cm	KN/cm	KN/cm	
Azotea	537	355	-182.50	-34%
Piso 8	934	809	-124.88	-13%
Piso 7	1126	1074	-52.08	-5%
Piso 6	1204	1221	16.79	1%
Piso 5	1240	1298	57.74	5%
Piso 4	1282	1412	130.06	10%
Piso 3	1336	1512	175.82	13%
Piso 2	1421	1601	180.09	13%
Piso 1	1615	1721	106.56	7%
Planta Baja	2796	2205	-591.34	-21%

Análisis en Y

Caso Sismo en Y (Sy)

Tabla 43 – Comparación de rigideces de piso – Análisis en Y

Nivel	Rigideces		Diferencia	Porcentual
	Sin aislador	Con aislador		
	KN/cm	KN/cm	KN/cm	
Azotea	636.36	469.48	-166.88	-26%
Piso 8	1197.62	1063.69	-133.94	-11%
Piso 7	1518.99	1403.60	-115.39	-8%
Piso 6	1754.80	1666.67	-88.13	-5%
Piso 5	2042.59	1953.39	-89.20	-4%
Piso 4	2125.31	2072.63	-52.67	-2%
Piso 3	2201.96	2157.95	-44.01	-2%
Piso 2	2312.94	2246.23	-66.71	-3%
Piso 1	2678.88	2481.03	-197.85	-7%
Planta Baja	4639.34	3105.16	-1534.18	-33%

Se puede observar una disminución de rigidez en la estructura en general, acrecentándose en los dos primeros y dos últimos niveles. Esto se debe al cambio de vinculación en la base de las columnas de subsuelo. Esta puede tomarse como una de las desventajas de la aplicación de un aislador, pero sin llegar a tener una influencia significativa en el comportamiento de la estructura.

6. Análisis de confort

El confort de los ocupantes de los edificios de altura que soportan la acción de un sismo o del viento, es un tema de gran importancia en el diseño. El movimiento oscilatorio de las construcciones puede derivar en distintas reacciones en las personas, tanto efectos psicológicos y fisiológicos tales como ansiedad, mareos, molestias visuales o temor, llegando hasta náusea aguda. Por otro lado, las oscilaciones excesivas producen fisuración de muros y tabiques, rotura de vidrios, caída de revestimientos. Sin embargo, no se puede diseñar un edificio para que las oscilaciones en él sean siempre imperceptibles ya que esto resultaría muy costoso. Por esto el problema del diseño consiste en mantenerlos dentro de los límites aceptables para el bienestar de los usuarios y no afectar su confort.

Una forma de determinar aproximadamente la naturaleza de la respuesta humana a las vibraciones es a partir de las aceleraciones. El investigador Fu-Kuei Chang realizó un análisis de la respuesta de las personas a los movimientos de un edificio, desarrollando una clasificación de las respuestas en función de la aceleración de la estructura, la cual publicó en (F. ASCE) Assoc., Ammann & Whitney, Inc., New York, N.Y. a lo que denominó “Respuesta Humana a los Movimientos en Edificios de Altura”.

Tabla 44- Fu-Kuei Chang - “Respuesta Humana a los Movimientos en Edificios de Altura” - (F. ASCE) Assoc., Ammann & Whitney, Inc., New York, N.Y

Aceleración en porcentaje de gravedad	Límites de confort
<0.5%	No es perceptible
0.5% a 1.5%	Perceptible
1.5% a 5.0%	Incomodo
5% a 15%	Muy incomodo
>15.0%	Intolerable

En este trabajo se realiza un análisis del edificio para el caso sin aislación de base y con aislación de base. Para esto primero se definen algunas ecuaciones.

$$X=A*\cos(\omega t) \rightarrow \text{Desplazamiento máximo}$$

$$X'=-A\omega*\sin(\omega t) \rightarrow \text{Velocidad máxima}$$

$$X''=-A\omega^2*\cos(\omega t) \rightarrow \text{Aceleración máxima}$$

$$X'' = -A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

$$X'' = \frac{-A \cdot 4 \cdot \pi^2}{T^2} \cdot \cos(2\pi)$$

$$X = \frac{-A \cdot 4 \cdot \pi^2}{T^2}$$

Análisis de confort en edificio - Sin aislamiento de base			
	g	9.81	m/seg ²
Período natural de la estructura			
	T	1.47	seg
Desplazamiento máximo de la estructura			
	A	0.0562	m
Vibración Sinusoidal			
	$X'' = \frac{A \cdot 4 \cdot \pi^2}{T^2}$		
	X''	1.03	m/seg ²
Fración de gravedad			
	X''/g	0.105	
	X''/g	10.5%	Muy Incomodo

Análisis de confort en edificio - Con aislación de base			
	g	9.81	m/seg ²
Período natural de la estructura			
	T	2.81	seg
Desplazamiento máximo de la estructura			
	A	0.0968	m
Vibracion Sinusoidal			
	$X'' = \frac{A*4*\pi^2}{T^2}$		
	X''	0.48	m/seg ²
Fraccion de gravedad			
	X''/g	0.049	
	X''/g	4.9%	
			Incomodo

Como se puede observar en los resultados, se pasa de 1.03 m/seg² en el caso sin aislación de base, a 0.48 m/seg² en el caso con aislación. Con esto se pasa de caer en el sector de “Muy incómodo” en la tabla del señor Chang a “Incómodo”, con una diferencia significativa de 0.056g.

7. Conclusiones

Al incorporar aisladores de base en la estructura de un edificio lo que se hace es disminuir las aceleraciones del sismo transmitidas desde el suelo al edificio. Se busca ampliar los períodos de vibración del sistema, y trasladar los mayores desplazamientos a los aisladores, logrando de esta manera velocidades menores en la estructura, esfuerzos menores y mejores sensaciones para sus ocupantes.

Como se puede ver en los cuadros comparativos, se cumplen estos objetivos esperados, logrando pasar de un período fundamental de 1.47 segundos en la estructura convencional, a un periodo de 2.81 segundos en la estructura con aisladores. Los desplazamientos absolutos pasan de 5.62 y 4.18 centímetros en las direcciones X e Y respectivamente en el caso sin aisladores, a 9.68 y 8.40 centímetros en el caso con aisladores. Si bien se ve un incremento significativo en los desplazamientos, gran parte de estos los absorbieron los aisladores. Es por esto que se puede ver una disminución en los desplazamientos relativos de todos los niveles. Al disminuir los desplazamientos relativos por niveles se concluye que los esfuerzos generados por el sismo en los elementos estructurales son menores. Esto se corrobora al realizar la comparación de los esfuerzos de columnas nivel por nivel. Además, el hecho que los aisladores tengan una capacidad limitada de transmisión de esfuerzos, hace que se exija menos a la superestructura.

Por otro lado, al variar los apoyos de una estructura, esta experimenta un cambio en sus rigideces de piso. En el análisis comparativo de rigideces por niveles de los casos con y sin aislación, se puede observar una disminución en el caso 2 donde se cuenta con los aisladores. Esta se debe a la baja rigidez de los mismos comparado con el tipo de vinculación aplicado en el caso 1 en el cual se consideró a las columnas empotradas a la base. La variación del apoyo modificó el comportamiento de toda la estructura en su conjunto. Los niveles más afectados por este cambio fueron la planta baja y los dos últimos, manteniéndose los niveles del medio sin grandes variaciones de rigidez.

En el análisis de confort del edificio frente a la incidencia de un sismo, basado en la clasificación del investigador Fu-Kuei Chang, se obtuvo diferencias entre el caso con y sin aislación de base. Al comparar los resultados de ambos casos, se concluye que hay un mejor comportamiento del caso 2 del edificio (con aisladores de base). Se pasa de tener un resultado en la clasificación de “Muy Incómodo” en el caso sin aislación, a “Incomodo” en el caso con aislación. Además, se puede observar una disminución de un 53% en la aceleración máxima. Esto se traduce en un edificio de mayor confort, en el que sus ocupantes percibirán el sismo como una acción menos significativa. Esto prueba que es una técnica factible para disminuir derivas y aceleraciones de piso sin repercusiones entre estas.

8. Bibliografía

- *International Conference of Building Officials*. (April 1997). *Structural Engineering Design Provisions*. “Uniform Building Code”. Volume 2. 3th Edition.
- *Ministerio de Planificación Federal*. (Julio 2013). “Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes”. Reglamento INPRES-CIRSOC 103. Buenos Aires, Argentina.
- *Ministerio de Planificación Federal*. (Julio 2005). “Reglamento Argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras”.- Reglamento CIRSOC 101. Buenos Aires, Argentina.
- *Ministerio de Planificación Federal*. (Julio 2005). “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. Reglamento CIRSOC 201. Buenos Aires, Argentina.
- *SEPROINCA*. (Julio 2018). “Clase 12. Paso a paso del análisis sísmico con SAP200 en edificio de 4 Niveles”.
- *SEPROINCA*. (Julio 2019). “Análisis sísmico con SAP200”. [YouTube/WsqSaFHJX80&t](https://www.youtube.com/watch?v=WsqSaFHJX80&t)
- *Ing. Rubén Chacín - CH Proyects* (Abril 2021). “Aisladores Sísmicos Elastoméricos con Núcleo de Plomo (LRB)”. [YouTube/ouh8XAkghiQ&ab](https://www.youtube.com/watch?v=ouh8XAkghiQ&ab). Bs. As., Argentina.
- *Dynamic Isolation Systems (DIS) Inc.* (Agosto 2007). Catálogo “Aislamiento sísmico para edificaciones y puentes”. <http://www.dis-inc.com/>. Nevada, EEUU.
- *Cassano A.M.* (Agosto 2009). “Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas”. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
- *Fu-Kuei Chang*. (Junio 1973). “Respuesta Humana a los Movimientos en Edificios de Altura” - (F.ASCE) Assoc., Ammann & Whitney, Inc., New York, N.Y.
- *Tapia Delgado, Christian Adrian – Ventelanga Mena, Luis David* (2017) – “Diseño de aisladores sísmicos LRB y análisis por desempeño de edificios”- Escuela de Ingeniería Civil – Universidad de Cuenca, Ecuador.

9. ANEXO

9.1. Reglamento INPRES CIRSOC 103

En Argentina las construcciones sismorresistentes se basan en los lineamientos del reglamento INPRES CIRSOC 103 – “Reglamento argentino para construcciones sismoresistentes”, el cual establece los requerimientos y provisiones mínimas para el diseño, construcción, reparación y refuerzo de construcciones que puedan estar sometidas a excitaciones sísmicas.

Las acciones sísmicas de diseño, procedimiento de análisis, requerimientos de resistencia y estabilidad, limitaciones de deformaciones, disposiciones constructivas y provisiones generales se establecen con los siguientes objetivos:

- Evitar pérdidas de vidas humanas y accidentes que pudieran originarse por la ocurrencia de cualquier evento sísmico, protegiendo los servicios y bienes de la población.
- Evitar daños en la estructura y en los componentes de la construcción durante los sismos de frecuente ocurrencia.
- Reducir al mínimo los daños en las componentes no-estructurales y evitar perjuicios en la estructura durante los sismos de mediana intensidad.
- Evitar que se originen colapsos y daños que puedan poner en peligro a las personas o que inutilicen totalmente las estructuras durante sismos muy severos de ocurrencia extraordinaria.
- Lograr que las construcciones esenciales destinadas a los servicios de emergencia continúen funcionando, aún ante sismos destructivos.

Campo de Validez:

Este reglamento se aplica a todas las construcciones nuevas que se realicen dentro del territorio de la República Argentina, al refuerzo de las construcciones existentes ejecutadas sin provisiones sismorresistentes y a la reparación de las construcciones que resultaran dañadas por la acción de los sismos.

Esta Norma divide al país en distintas zonas de acuerdo con el grado de peligrosidad sísmica. En la tabla 1 se especifica la zonificación sísmica del territorio nacional en función del grado de peligrosidad sísmica.

Zona	Peligrosidad Sísmica
0	Muy reducida
1	Reducida
2	Moderada
3	Elevada
4	Muy elevada

La provincia de Salta, se encuentra ubicada en una zona con distintos grados de peligrosidad, encontrando territorios con peligrosidad 1, 2 y 3. Pero específicamente la ciudad de Salta, se encuentra dentro de una zona cuyo grado de peligrosidad es 3, por lo que resulta de fundamental importancia tener en cuenta el accionar del sismo a la hora del diseño de las estructuras.

Además, con el objeto de establecer los requerimientos de previsiones sismorresistentes, las construcciones se agrupan de acuerdo con sus funciones y con la trascendencia que pueden tener eventuales daños o colapsos de las mismas en caso de ocurrencia de sismos.

Grupo A0: Construcciones que cumplen funciones esenciales y cuya falla producirá efectos catastróficos: Ej.: centros militares, hospitales, centrales de bomberos, instalaciones de servicios sanitarios, centrales de comunicación, de energía, aeropuertos, depósitos de sustancias tóxicas, radio activas o combustibles.

Grupo A: Construcciones con alto factor de ocupación, donde se guarden contenidos de gran valor para la comunidad y/ o interés para la producción. Ej.: sedes de edificios públicos, edificios educacionales, cines, teatros, templos, estadios, museos, archivos, bancos, grandes hoteles, edificios comerciales, y/o industriales de elevada densidad.

Grupo B: Construcciones cuyo colapso produciría pérdidas de magnitud intermedia. Ej.: viviendas, edificios privados de habitación, edificios comerciales, industriales y de uso público no comprendidos en el grupo A

Grupo C: Construcciones cuya falla produciría pérdidas de escasa magnitud y no causaría daños a las construcciones de los grupos anteriores. Ej.: tinglados, establos, construcciones precarias.

En la tabla 2 del reglamento se establecen los valores del factor de riesgo δ_d según el grupo al que pertenezca la construcción

Construcción	δ_d
Grupo A0	1,4
Grupo A	1,3
Grupo B	1

Para las construcciones del grupo C no se requiere el análisis bajo las acciones sísmicas.

9.2. Catálogo “Aislamiento sísmico para edificaciones y puentes”- Dynamic Isolation Systems (2007)

Propiedades técnicas del aislador

TAMAÑO DEL DISPOSITIVO				DIMENSIONES DE LA PLACA DE SOPORTE					
Diámetro Aislador, D_L (mm)	Altura Aislador, H (mm)	Número de capas de caucho, N	Diámetro del plomo, D_L (mm)	L (mm)	t (mm)	Cantidad Orificios	Orificio ϕ (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

(1) Las capacidades de carga axial corresponden a los máximos desplazamientos basados en los límites de diseño del 250% de tensión de corte del caucho o 2/3 del diámetro del aislador. El desplazamiento real de un aislador y la capacidad de carga dependen del módulo y número de capas de caucho.

(2) Los Módulos de Corte del Caucho (G) están disponibles desde 0.38 N/mm² hasta 0.70 N/mm².

(3) Para el modelado analítico bilineal de la rigidez elástica, utilice $K_e = 10 \cdot K_d$.

Fig. N° 32 - Cuadro de especificaciones dimensionales aisladores “DIS”

Diámetro Aislador, D_i (mm)	PROPIEDADES DE DISEÑO			Desplazamiento Máximo, D_{max} (mm)	Capacidad Carga Axial P_{max} (kN)
	Rigidez Producida, K_d (kN/mm)	Resistencia Características Q_d (kN)	Rigidez a la compresión, K_v (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000

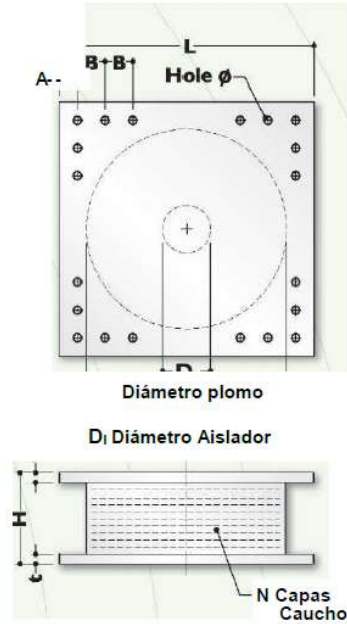


Fig. N° 33 - Cuadro de rangos de capacidad según dimensiones de aisladores “DIS”

9.3. Ejemplos de estructuras con aislamiento basal sísmico:

En los últimos años se ha observado la implementación de sistemas de aislación en diferentes estructuras. A continuación, se da a conocer algunos edificios que han empleado esta metodología de aislamiento basal sísmico.

- Hospital Universitario de California del Sur:



Fig. N° 34 - Hospital Universitario de California del Sur

Es una estructura de 8 pisos apoyada sobre 149 aisladores del tipo NRB y LRB.

- Fábrica de manufactura de Evans y Sutherland:



Fig. N° 35 - Fábrica de manufactura de Evans y Sutherland

Es un edificio de 4 plantas ubicado cerca de las fallas Warm Springs and East en la ciudad de Lago Salado, Utah, Estados Unidos. Esta estructura está apoyada sobre 98 aisladores del tipo LRB y NRB. El desplazamiento esperado para el sistema es de 23 cm a un periodo de 2.0 segundos.

- Edificio de la Ciudad de Lago Salado, Utah, Estados Unidos:



Fig. N° 36 - Edificio de la Ciudad de Lago Salado

Esta estructura de 5 plantas fue construida entre 1892-1894, fue restaurado mediante la instalación de aisladores sísmicos (447 en total) del tipo LRB y NRB.

- Edificio Bridgestone Toranomon, Tokio, Japón:



Fig. N° 37 - Edificio Bridgestone Toranomon

Este edificio es un distribuidor mayoritario de aisladores de goma, el cual se encuentra aislado por 12 aisladores de goma, 25 amortiguadores metálicos y 8 aisladores viscosos.

- Palacio Municipal de San Francisco, Estados Unidos:



Fig. N° 38 - Palacio Municipal de San Francisco

Restaurada en 1994 mediante 530 aisladores del tipo LRB. La instalación de los aisladores resulta muy compleja al apuntalar, cortar y transferir la carga de las columnas a soportes temporales.

- Hospital V.A. Long Beach, California, Estados Unidos:



Fig. N° 39 - Hospital V.A. Long Beach

Estructura de 12 pisos aislada mediante 128 aisladores del tipo LRB y NRB, y 18 aisladores de fricción.