

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE AISLACIÓN SÍSMICA EN EDIFICACIONES DE MEDIANA ALTURA

R. Retamales⁽¹⁾, P. Bonelli⁽²⁾, R. Boroschek⁽³⁾ y J. Carvallo⁽⁴⁾

⁽¹⁾Ingeniero Civil Universidad de Chile, Jefe Área Protección Sísmica Rubén Boroschek & Asociados Ltda., rodrigo.retamales@rbasoc.cl

⁽²⁾Ingeniero Civil Universidad de Chile, Gerente General Patricio Bonelli & Asociados Ltda., patricio.bonelli@usm.cl

⁽³⁾Ingeniero Civil Universidad de Chile, Gerente General Rubén Boroschek & Asociados Ltda., gerencia@boroschek.cl

⁽⁴⁾Ingeniero Civil Pontificia Universidad Católica de Chile, Profesor Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, jcarvall@uc.cl

Resumen

El creciente interés de inversionistas y propietarios por proteger la operación y los contenidos de las edificaciones más allá de los objetivos mínimos de la normativa nacional vigente, ha resultado en la masificación del uso de sistemas no convencionales de protección sísmica tales como aislación sísmica y disipación de energía. En este trabajo se describe los efectos de aplicar aislación sísmica en un edificio residencial de 19 pisos. Se presentan los aspectos críticos de diseño e implementación. Se describe el efecto en la respuesta sísmica estructural y los costos económicos de su implementación.

Palabras Clave: Aislación Sísmica, Protección Sísmica

Abstract

The growing interest of investors and stakeholders in protecting building contents and operation beyond the goals of current national codes has generated an increased demand for the use of nonconventional seismic protection systems such as base isolation and energy dissipation devices. This paper focuses on the effects of using a seismic isolation system in a 19-story residential building. The critical issues related to seismic isolation design and implementation, along with its effects on the building response and economical costs are described.

Keywords: Seismic Isolation, Seismic Protection

1 Introducción

El terremoto del Maule del 27 de Febrero de 2010 generó pérdidas económicas que superaron los US\$30,000 millones. Un alto porcentaje de estas pérdidas corresponden a daños de componentes y sistemas no estructurales tales como sistemas arquitectónicos, contenidos y equipamiento eléctrico y mecánico [3]. Lo anterior, sumado a la percepción de la población respecto a los efectos del terremoto en sus propiedades, ha motivado a inversionistas e inmobiliarias a incorporar sistemas de protección sísmica en las estructuras a fin de alcanzar objetivos de desempeño superiores a los establecidos por la normativa nacional vigente. Entre los sistemas de protección sísmica que han sufrido un crecimiento exponencial de demanda se encuentran los sistemas de aislación sísmica. Este tipo de sistemas se ha utilizado extensamente, a nivel nacional e internacional, para la protección de función de infraestructura crítica y estratégica, en estructuras de elevado valor patrimonial, y en estructuras con contenidos de alto valor, entre los que se cuentan hospitales, datacenters, museos, edificios de gobierno y de control de emergencia, entre otros. Sin embargo, la mayoría de las

aplicaciones actuales de aislación sísmica de base en Chile corresponden a edificaciones de relativamente baja altura. El presente trabajo describe los efectos de la aplicación de un sistema de aislación sísmica basado en aisladores de goma con núcleo de plomo en el edificio residencial Torre del Sol de Copiapó, proyecto desarrollado por Inmobiliaria Santo Domingo Ltda. y construido por Constructora ALCORP S.A. El diseño estructural del edificio fue desarrollado por Patricio Bonelli & Asociados Ltda. El diseño del sistema de aislación fue desarrollado por Rubén Boroschek & Asociados Ltda.

El diseño del sistema de aislación sísmica se efectuó en conformidad con las disposiciones de la norma Chilena NCh2745.Of2003 [1]. El diseño fue desarrollado por los especialistas de RBA (www.rbasoc.cl) en estrecha colaboración con los especialistas de Dynamic Isolation Systems Inc. (www.dis-inc.com), empresa líder en aislación sísmica a nivel mundial, que ha aislado cerca de 400 estructuras en el mundo, correspondiendo una veintena de ellas a edificaciones en altura de hasta 33 pisos. El excelente comportamiento sísmico de las edificaciones con aislación sísmica ha quedado demostrado durante los terremotos de Northridge (EEUU, 1994), Kobe (Japón, 1995), Maule (Chile, 2010) y recientemente Tuhoku (Japón, 2011). Una detallada descripción del desempeño de las edificaciones con aislación sísmica afectadas por el terremoto de Tuhoku, Japón, se puede encontrar en [4].

2 Implementación del Sistema de Aislación Sísmica

El Edificio Torre sol de Constructora ALCORP S.A., que poseerá 19,000 m² construidos, aproximadamente, y 19 niveles en total (1 piso mecánico a nivel de aislación, 2 subterráneos, 14 pisos, 1 nivel de equipamiento y 1 niveles de sala de máquinas), será el edificio residencial con aislación sísmica de base más alto de América Latina. La planta típica del edificio es de 53x12.9 m. La altura total del edificio, incluidos los subterráneos, es de 49.6 m. El peso sísmico de la estructura por sobre la interfaz de aislación es de 15500 Tonf. La Fig. 1 muestra una vista isométrica de la estructura, mientras que la Fig. 2 muestra una planta del piso tipo. Conforme al reporte de mecánica de suelos, elaborado por GEO Consultores, el suelo de fundación correspondería a Suelo Tipo II del Decreto Supremo DS 117 de Febrero de 2011. La velocidad promedio de propagación de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad es $V_s = 598$ m/s.

Para este proyecto se ha escogido el uso de aisladores de goma con núcleo de plomo por un sinnúmero de razones, entre las que destacan: estos sistemas han sido ampliamente ensayados en laboratorio y su comportamiento ha sido extensivamente probado durante eventos sísmicos reales; la facilidad de predecir y modelar su comportamiento para efectos de análisis; la estabilidad de las propiedades ante agentes ambientales; y la independencia del comportamiento del dispositivo con la velocidad de carga.

El número de aisladores requeridos fue determinado principalmente por la geometría del edificio. A fin de proveer estabilidad a la estructura se requirió implementar vigas de 60x197 cm de sección bajo el sector de estacionamientos en el segundo subterráneo, a fin de eliminar las tracciones de los aisladores. Si bien esfuerzos de tracción de hasta 2G (donde G es el módulo de corte para una deformación de corte del 100%) son permitidas por los códigos de diseño, el ensayo para cargas de tracción puede efectuarse en un número limitado de laboratorios a nivel mundial. Aisladores sísmicos se dispusieron en los extremos de las vigas y en general en todos los extremos de muros. La Fig. 3 muestra la planta del nivel de aislación y una elevación de la estructura aislada. Como alternativa al uso de vigas macizas bajo los estacionamientos se evaluó el uso de rieles tipo CLB (siglas en inglés para Cross Linear Bearing), pero por su costo fueron desechados. Para otras aplicaciones, CBL's pueden ser la única alternativa para la implementación de aislación sísmica de base en edificaciones en altura.

Otra alternativa evaluada para resistir eventuales tracciones fue el uso de cables de tensado al interior de los aisladores [2], de modo de ejercer una precompresión y prevenir tracciones. Sin embargo, esta alternativa también fue desechada por la longitud requerida para los cables de modo que no fluyeran ante las deformaciones impuestas por el desplazamiento de la interfaz de aislación de la estructura aislada. A fin de reducir costos, los 45 aisladores sísmicos utilizados en la estructura son idénticos. La fuerza máxima de compresión sobre los aisladores (considerada para diseño y ensayo) es de 820 Tonf, mientras que la fuerza máxima de tracción (o mínima de compresión) es de 0 Tonf.



Fig. 1 - Vista Isométrica
(Imagen gentileza
Constructora ALCORP S.A.)

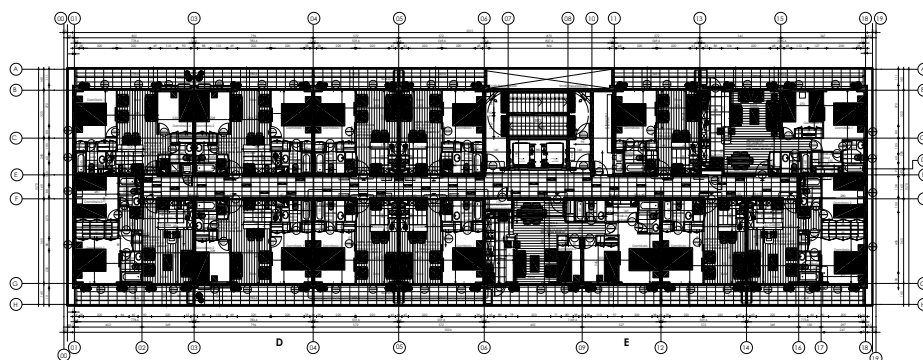


Fig. 2 - Planta Arquitectura Piso Tipo (Imagen gentileza de BGL Arquitectos)

2.1 Ensayos del sistema de aislación

Los aisladores sísmicos de prototipo y la totalidad de los aisladores sísmicos de obra fueron sometidos a una exhaustiva serie de ensayos de compresión y corte combinados a fin de validar las propiedades consideradas en el diseño y verificar la estabilidad de los aisladores para cargas sísmicas extremas. La Fig. 4 muestra una comparación del modelo de aislador considerado en el diseño y la respuesta observada durante los ensayos de laboratorio. En la figura se puede observar la excelente correlación entre las propiedades nominales consideradas en el diseño y las observadas en laboratorio. De manera similar, la Fig. 5 muestra las propiedades de la goma derivadas de los ensayos efectuados sobre distintos aisladores de prototipo. En esta figura se puede observar la estabilidad del material durante la serie de ensayos efectuados. En particular, se puede observar que la goma es bastante rígida ($G \sim 17-18 \text{ kgf/cm}^2$) cuando se somete a ensayos cíclicos a deformaciones pequeñas, comparables con el nivel de deformaciones inducidas por cargas de viento. La deformación de corte total de la goma corresponde a la suma de las deformaciones de corte por compresión y corte directo de los aisladores. Conforme a los ensayos de laboratorio, los amortiguamientos efectivos provistos por el sistema de aislación serían de 25 y 23% para los sismos de diseño y máximo posible, respectivamente.

2.2 Efectos de uso del sistema de aislación

El modelo de análisis de estructura se ha desarrollado en ETABS. La estructura principal se ha modelado lineal elástica, mientras que los aisladores se han modelado considerando sus propiedades no lineales. La Fig. 6 muestra una vista isométrica del modelo de análisis considerado. La Tabla 1

resume las propiedades dinámicas de las estructuras con aislación sísmica y con base fija. En la tabla se puede observar como el periodo de la estructura aislada se ha desplazado en relación a la estructura de base fija. También es importante destacar el importante aumento, de un 44 a un 97%, de la participación de los primeros modos de vibrar en la respuesta de la estructura aislada, con la consecuente reducción de la participación de los modos superiores.

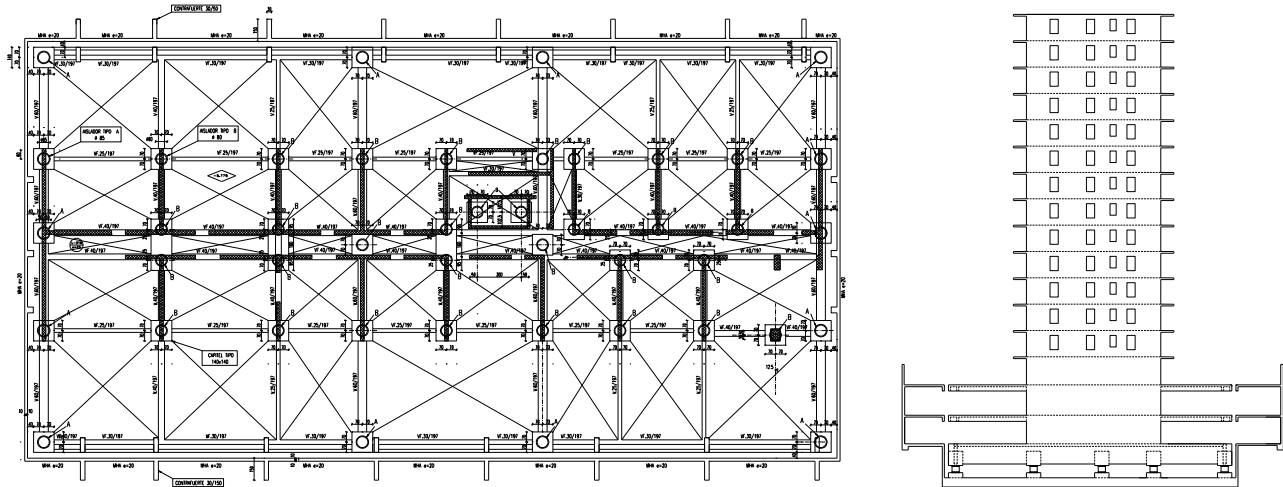


Fig. 3 - Planta y Elevación Sistema de Aislación

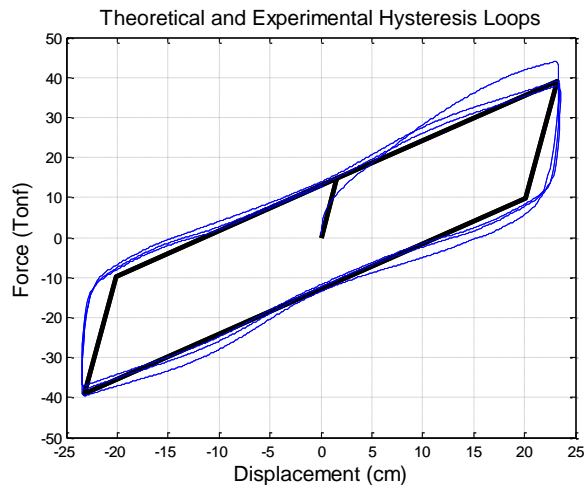


Fig. 4 - Comparación Loops

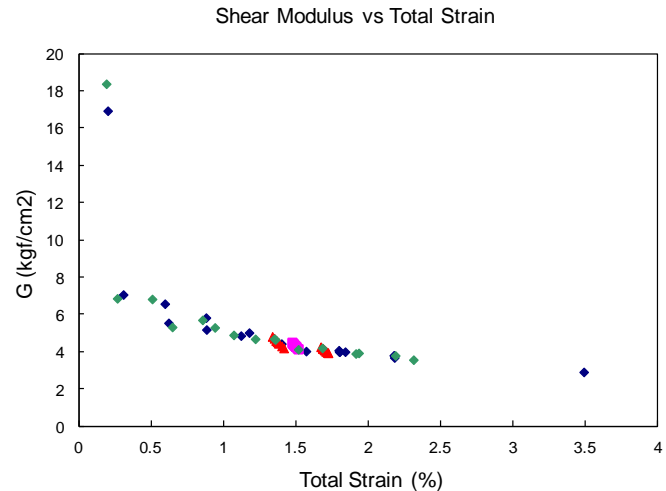


Fig. 5 - Propiedades de Goma

Para el diseño del sistema de aislación se ha efectuado una serie de análisis dinámicos no lineales considerando siete registros sísmicos compatibles con las demandas asociadas al sismo máximo posible de la norma NCh2745.Of2003, para la zona sísmica, distancias fuente-sitio y condiciones de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura. Se han seleccionado intencionalmente una variedad dispersa de registros semilla, de eventos sísmicos de distinta magnitud, de manera que los análisis permitan capturar las diferentes acciones sísmicas a las cuales la estructura pueda verse expuesta durante su vida útil. La Fig. 7 muestra una comparación del espectro de diseño de la norma (en negro) y el promedio de los espectros de respuesta de los registros considerados (en rojo), una vez escalados.

La Tabla 2 muestra una comparación del promedio de los cortes basales obtenidos para los siete registros considerados. En la tabla se observa que el uso de aislación permite alcanzar una reducción de un 88% en los cortes basales promedio de la estructura. El diseño de la superestructura se efectuó considerando el corte máximo que puede ser transmitido por el sistema de aislación. La zona crítica de la estructura, donde se concentra la demanda de deformaciones sísmicas, corresponde en este caso a la interfaz de aislación, por lo que no fue necesario incluir el confinamiento según ACI318. La demanda de desplazamientos se acomoda mediante la deformación de los aisladores y no por la rotación de las secciones de los muros de hormigón. Las Figs. 8 y 9 muestran comparaciones de la distribución de desplazamientos de piso, deformaciones de entrepiso y aceleraciones absolutas a lo alto de los edificios aislados y de base fija, para las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente. Los valores que se muestran corresponden a los valores promedios obtenidos para los siete registros considerados. Las desviaciones estándar promedio de las respuestas de aceleraciones y deformaciones de entrepiso de la estructura de base fija son iguales a 0.47g y 0.008, respectivamente. Para el caso de la estructura aislada estos valores se reducen a 0.05g y 0.002, respectivamente.

Tabla 1. Comparación propiedades dinámicas estructuras aisladas y base fija

Modo	Estructura Aislada			Estructura Base Fija		
	Periodo (s)	Masa Participante		Periodo (s)	Masa Participante	
		Dir. Long.	Dir. Trans.		Dir. Long.	Dir. Trans.
1	2.89	0.21%	97.4%	0.76	0.13%	44.0%
2	2.84	99.7%	0.24%	0.58	25.0%	3.30%
3	2.25	0.05%	2.14%	0.56	29.6%	1.56%
4	0.58	0.00%	0.19%	0.16	12.2%	1.25%
5	0.45	0.00%	0.00%	0.16	1.61%	11.2%
6	0.40	0.05%	0.00%	0.12	0.05%	2.76%

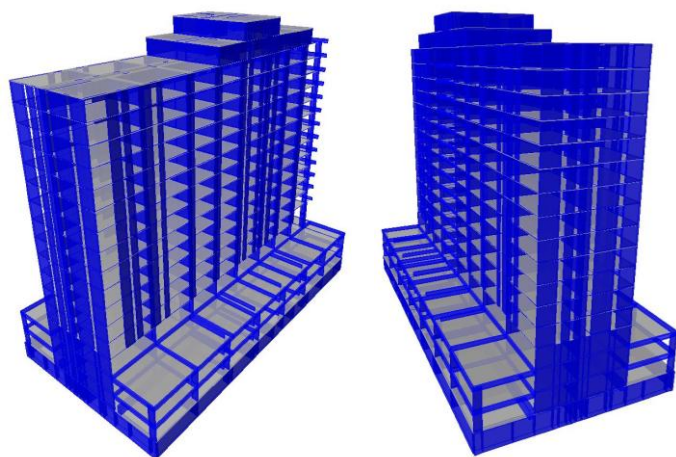


Fig. 6 - Vista 3-D Modelo de Análisis

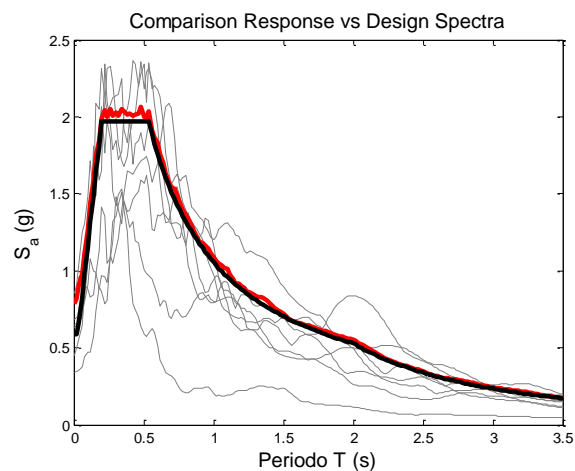


Fig. 7 - Comparación Espectro de Diseño y Espectros de Respuesta Registros Considerados

Las Figs. 8a y 9a permiten comparar los perfiles de deformaciones de las estructuras aisladas y con base fija. En ambas figuras se puede observar que en la estructura aislada la deformación se concentra en la interfaz de aislación, mientras que en la estructura convencional (de base fija) las deformaciones se distribuyen a lo alto del edificio, con el consecuente daño estructural y no estructural. En las Figs. 8a y 9a se observa que el desplazamiento de la interfaz de aislación en las direcciones longitudinal y transversal sería del orden de los 20 cm para el sismo considerado.

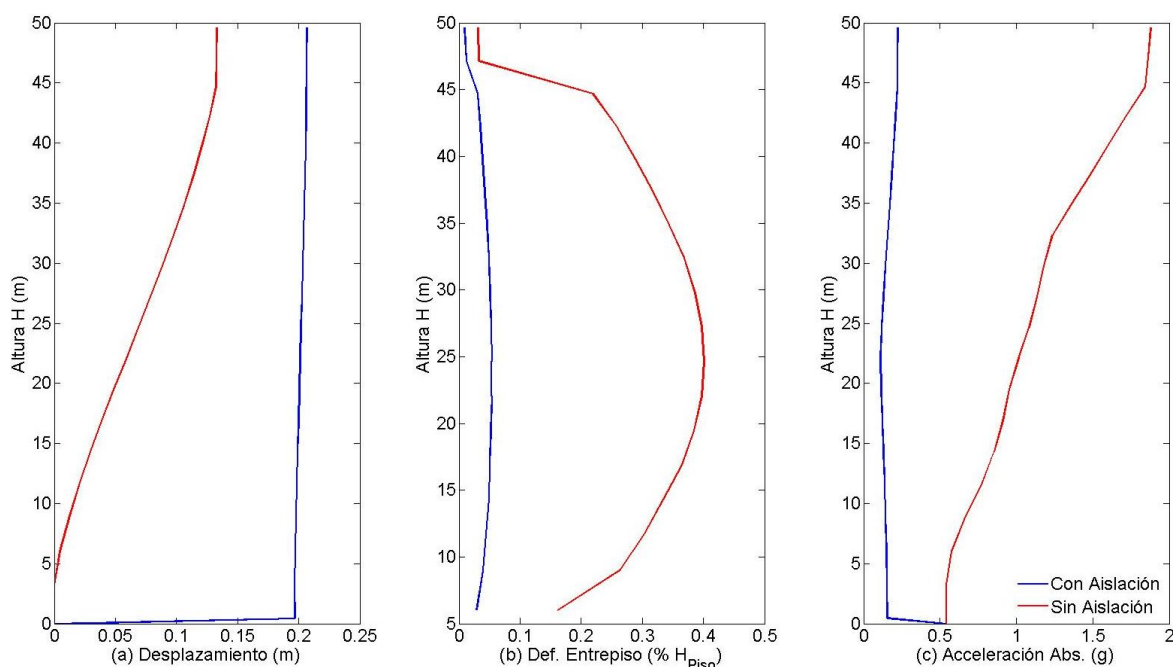


Fig. 8 - Comparación de Respuestas Dirección Longitudinal

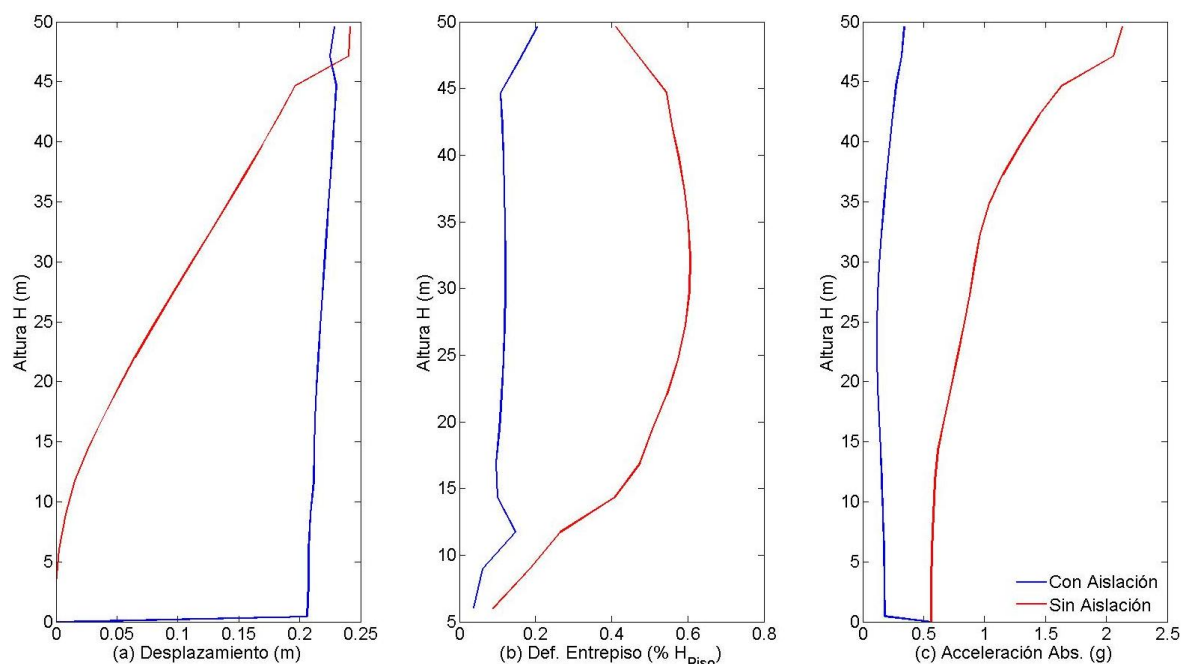


Fig. 9 - Comparación de Respuestas Dirección Transversal

Las Figs. 8b y 9b muestran comparaciones de las deformaciones de entre piso de las estructuras aislada y de base fija, para las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente. En las figuras se observa que el uso de aislación sísmica permite reducir las deformaciones de entrepiso máximas promedio de 0.6 a 0.15%, aproximadamente, con la consecuente reducción de daño de componentes no estructurales sensibles a deformaciones. Finalmente, las Figs. 8c y 9c muestran comparaciones de las aceleraciones absolutas de piso. En las figuras se puede observar que las aceleraciones absolutas máximas promedio se reducen de 2.0g en la estructura de base fija a 0.3g, aproximadamente, en la estructura con aislación sísmica de base. Esta importante reducción en la aceleración representa una mejora sustancial del confort de los ocupantes del edificio en caso de un sismo severo, y una reducción de los daños del mobiliario y contenidos no anclados de la estructura y de los componentes no estructurales sensibles a aceleraciones.

Tabla 2. Comparación cortes basales promedio (Tonf)

Dirección	Estructura		Reducción
	Base Fija	Aislada	
Longitudinal	13011	1492	89%
Transversal	13010	1580	88%

2.3 Análisis de fragilidad

A fin de evaluar el impacto del sistema de aislación sobre la probabilidad de ocurrencia de daño estructural y no estructural en el edificio, se ha efectuado un análisis simplificado de fragilidad sísmica, considerando como referencia la información genérica disponible en HAZUS [5]. Si bien este análisis no constituye ni pretende ser un estudio detallado del riesgo sísmico de la estructura, proporciona una herramienta simplificada de evaluación del impacto de incorporar el sistema de aislación. Las curvas de fragilidad indican la probabilidad de alcanzar un determinado nivel de daño (DS) en la estructura o en los componentes no estructurales en función de la demanda sísmica, la que es caracterizada por un parámetro de demanda denotado EDP (Engineering Demand Parameter). La forma funcional de las curvas de fragilidad está dada por la Ec. (1):

$$F_{DS_i}(edp) \equiv P(DS_i \geq ds | EDP = edp) = \Phi\left(\frac{\ln(edp/x_m)}{\beta}\right) \quad (1)$$

donde el subíndice i denota el i -ésimo nivel de daño, x_m corresponde a la demanda media que detona un determinado nivel de daño, y β corresponde a la desviación logarítmica estándar. El operador Φ corresponde a la función de densidad de probabilidad normal estándar acumulada. La Fig. 10 muestra las curvas de fragilidad obtenidas para la estructura y los componentes no estructurales. Las Figs. 10a y 10b resumen las probabilidades de alcanzar distintos niveles de daño en función de dos EDP distintos: deformación de entrepiso y aceleración máxima del suelo. Considerando los valores promedio de deformaciones de entrepiso de las estructuras con y sin aislación, equivalentes a 0.0023 y 0.0111, se puede inferir, como referencia, que la probabilidad de observar daño moderado se reduce de 69 a 5% al incorporar el sistema de aislación, mientras que la probabilidad de observar daño extenso se reduce de 26 a 0%. Un análisis similar se puede efectuar para los otros niveles de daño y/o considerando la aceleración del suelo como parámetro de demanda.

De manera similar, se ha efectuado un análisis simplificado de la fragilidad sísmica de los componentes y sistemas no estructurales. Las Figs. 10c y 10d muestran las curvas de fragilidad obtenidas. En las curvas se observa que, considerando las demandas promedio de piso, la probabilidad de observar daño moderado en componentes no estructurales sensibles a deformaciones se reduce de 53 a 5.8% al incorporar el sistema de aislación, mientras que la probabilidad observar daño moderado en componentes no estructurales sensibles a aceleraciones se reduce de 32 a 4.9%. Comparaciones similares pueden efectuarse para los otros niveles de daño, pero se omiten en este artículo por razones de espacio.

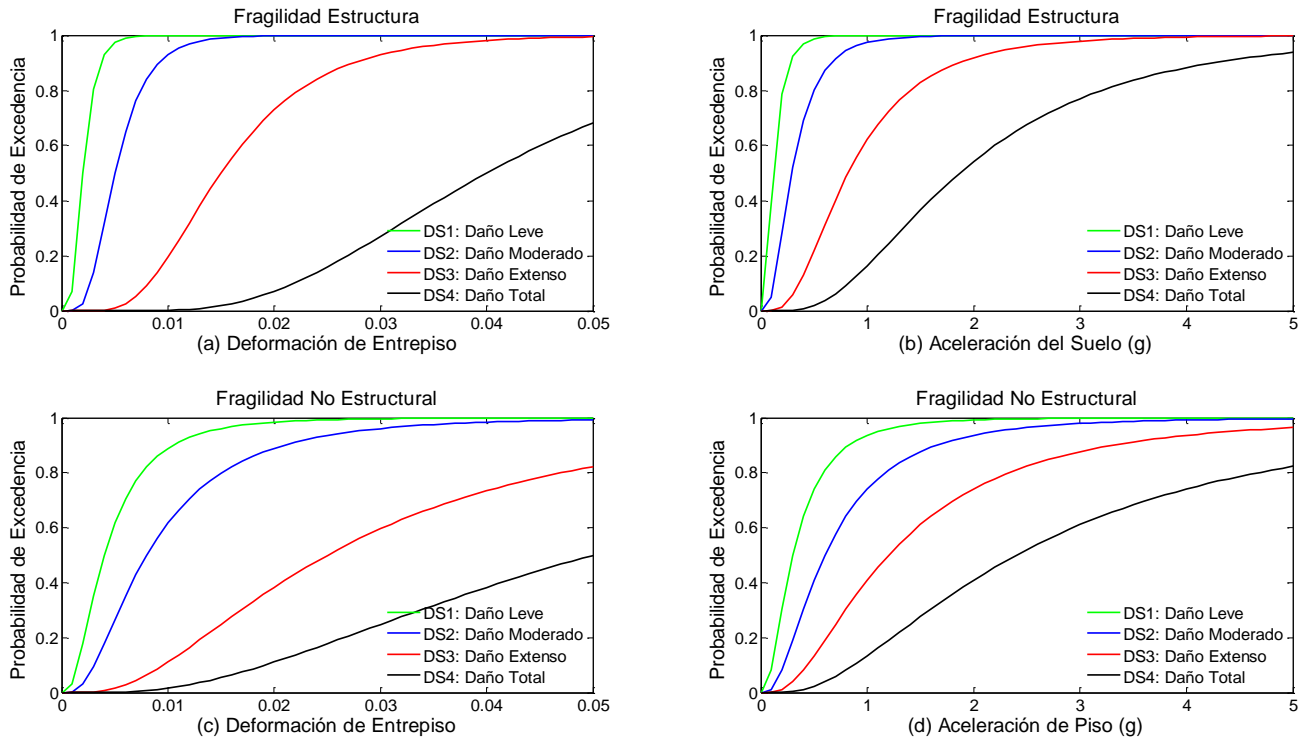


Fig. 10 - Curvas de Fragilidad Sísmica

2.4 Costos de referencia del sistema de aislación

Un aspecto crítico para la incorporación de sistemas de aislación sísmica en estructuras es su costo inicial. Si bien la mejor respuesta estructural durante eventos sísmicos severos es evidente, en general resulta difícil la decisión de inversión en protección. A modo referencial, los costos de los aisladores sísmicos para un proyecto de esta envergadura bordean los US\$8,000-US\$9,000 por unidad, a lo que se debe sumar los costos de los insertos a hormigón y de los pernos de anclaje. Adicionalmente, se debe incurrir en costos como los de las vigas V60x197 cm requeridas para la estabilización de la estructura y los costos de la sobre excavación requerida para acomodar la altura de los aisladores y de las vigas antes mencionados. Adicionalmente, se deben considerar los costos de las cubrejuntas de aislación y de los elementos flexibles requeridos para las instalaciones básicas y otros sistemas distribuidos que cruzan la junta de aislación. No obstante, los costos de la inversión inicial se compensan absolutamente con la reducción de la probabilidad de daño o colapso de la estructura.

Más aun, la incorporación de los sistemas de aislación podría permitir la reducción de la cantidad de muros estructurales del edificio dado a que, como se describe en las secciones anteriores, las

deformaciones elásticas de entrepiso de la estructura aislada no superan el dos por mil de la altura de entrepiso. Del mismo modo, el uso de aislación podría permitir prescindir de elementos de borde en muros, debido a las bajas demandas de deformación relativa entre el nivel de techumbre y el de aislación. Esta última medida permitiría, adicionalmente, reducir los espesores de muros. Estas medidas, sumada al diseño por corte mínimo de la estructura, pueden compensar los costos de inversión en protección sísmica.

3 Conclusiones

Una aplicación práctica ha demostrado la factibilidad de utilizar sistemas de aislación sísmica en una edificación de 19 pisos, contraviniendo la creencia profesional y de los inversionistas respecto a la imposibilidad de incorporar aislación sísmica en edificaciones de mediana altura. Más aun, la evaluación efectuada permite concluir respecto a la conveniencia de incorporar sistemas de protección sísmica en el ámbito inmobiliario a fin de incrementar la seguridad estructural. El sistema de aislación permite reducir las aceleraciones y deformaciones máximas de la estructura en un 75 y 85% respectivamente, con la consecuente reducción de probabilidades de daños y pérdidas económicas durante sismos excepcionalmente severos. Los costos de la inversión en protección pueden ser compensados en parte por las posibles reducciones de costos de la estructura, al reducir la demanda de diseño de corte máximo a corte mínimo y al eliminar los requisitos de confinamiento de los bordes de muros.

4 Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Ingeniero José Luis Larenas y al Constructor Civil Nicolás Larenas de Constructora ALCORP S.A.; a los arquitectos Carlos Belmar, Jorge Game y Macarena García de BGL Arquitectos; y a los Ingenieros Amarnath Kasalanati, Konrad Eriksen y Tung Ng de Dynamic Isolation Systems Inc.

5 Referencias

- [1] INN (2003). NCh2745.Of2003: *Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica*, Instituto Nacional de Normalización, 2003.
- [2] Kasalanati, A., and M. Constantinou (2005). *Testing and Modeling of Prestressed Isolators*, in Journal of Structural Engineering, Vol. 131, N°6, pp857-866.
- [3] Miranda, E., Mosqueda, G., Retamales, R., and G. Peckan (2012). *Performance of Nonstructural Components during the February 27, 2010 Chile Earthquake*, in Earthquake Spectra 28, pp. S453-S471.
- [4] Saito, T., Iba, M., Morita, K., Azuhata, T., and N. Inoue (2012). *Seismic Performance of Seismically Isolated Buildings at the Great East Japan Earthquake*, in proceedings of the 12th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, September 20-23, 2011, Sochi, Russia.
- [5] FEMA (2012). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.