

Eficiencia de aislamientos sísmicos basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos comparada con sistemas goma-metal

José E. Stuardi⁽¹⁾, Julio C. Massa^(1,2) y Leonardo J. Cocco⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina, jstuardi@gmail.com*

⁽²⁾ *Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina, jmassa@efn.uncor.edu*

RESUMEN

Los aisladores sísmicos formados por un paquete de resortes helicoidales conectados en paralelo con amortiguadores viscosos (Base Control System, BCS) son actualmente una alternativa técnica válida dentro del mercado dominado casi exclusivamente por la idea de la efectividad de aisladores compuestos por capas superpuestas de goma y metal.

En el presente trabajo se estudian las prestaciones obtenibles por distintos sistemas de aislamiento con variadas flexibilidades horizontales y verticales aplicados al caso del Edificio 3 de la Residencia Estudiantil de la Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional. Como variables de control se utilizan los desplazamientos máximos en la base y las aceleraciones y esfuerzos en zonas claves de la estructura. El análisis se lleva a cabo utilizando un modelo de elementos finitos y el método de respuesta espectral, con registros sísmicos y envolventes de espectros como excitatriz sísmica.

Se muestra la capacidad de filtrado de los sistemas dinámicos estudiados, haciendo hincapié en las contribuciones de las componentes horizontal y vertical a la respuesta. Se observa que si bien las aceleraciones transmitidas a la superestructura son menores para los aisladores de goma-metal, debido a la posibilidad de utilizar períodos naturales más largos, esta práctica queda limitada por la gran demanda de desplazamientos en los aisladores. Por otro lado, la reducción de esfuerzos en el hormigón debido al aislamiento es igualmente efectiva para ambos casos, debido a las características del desacoplamiento logrado.

Palabras Claves: aislamiento sísmico, amortiguadores, respuesta sísmica, aisladores de resorte, base control system.

1. INTRODUCCIÓN

En el aislamiento sísmico de base, la estructura es montada directamente sobre un conjunto de elementos flexibles con la finalidad de filtrar las aceleraciones sísmicas mediante un sistema resonante de baja frecuencia. Los dispositivos mecánicos (aisladores) deben ser capaces de soportar la demanda de esfuerzos y desplazamientos a los que serán sometidos durante un sismo, lo que origina complejos problemas tecnológicos. En muchos casos, el diseño del aislamiento de base responde más a la posibilidad de utilizar uno u otro material y sistema, que a una selección estricta de las propiedades realmente requeridas. Respecto de los dispositivos de aislamiento de base, se han realizado investigaciones y desarrollos teórico-prácticos de la más variada índole; proponiéndose diversas formas y materiales incluyendo deslizadores friccionales en base a acero inoxidable y teflón [1], sistemas pendulares friccionales [2], capas de elastómeros intercaladas con chapas de acero [3, 4] y combinaciones de ellos [5, 6]. Básicamente se pretende obtener una elevada elasticidad horizontal combinada con un alto amortiguamiento. Además de la elasticidad, otros requisitos apreciados son: capacidad de autocentraje después del sismo, estabilidad de los componentes constitutivos a agentes externos, durabilidad semejante a la vida útil de la estructura, simplicidad y precio reducido.

A partir de la tecnología desarrollada y la experiencia ganada en la utilización de resortes cilíndricos helicoidales de acero y amortiguadores basados en masa viscosa en el ámbito mecánico, se aplicó esta idea, a principios de los años 90 en California, al aislamiento de base de edificios sobre una estructura metálica de uso habitacional [7]. Con posterioridad se realizaron otros diseños de resortes y amortiguadores [8], que condujeron a definir el sistema BCS (Base Control System). En el año 2002, se instaló un sistema de aisladores basado en resortes y amortiguadores viscosos en la Residencia Estudiantil de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina). El desempeño sísmico del edificio [9] fue analizado tomando como base once señales sísmicas reales [10] y se compararon los resultados obtenidos con aisladores del tipo de elastómero laminado entre placas metálicas y núcleo de plomo (Lead Rubber Bearing, LRB) vs. aisladores del tipo BCS. Este último, que es el sistema finalmente instalado en obra, tiene una rigidez lineal tanto en dirección horizontal como vertical y un amortiguamiento cuyo comportamiento se aproxima a lineal viscoso [9].

La característica distintiva del aislamiento BCS utilizado es la flexibilidad vertical, ya que la relación de rigidez vertical/horizontal de los resortes helicoidales es de tan sólo 7,48; por otro lado la flexibilidad horizontal no es tan elevada como en el caso de los aisladores de goma. Esta flexibilidad vertical está acompañada de amortiguamiento en esta dirección, lo que evita resonancias indeseables. Los amortiguadores viscosos están compuestos por una carcasa inferior que contiene una masa viscosa, mientras que un pistón de la carcasa superior penetra en la masa y genera una fuerza viscosa en las tres direcciones ortogonales. Un manguito de protección cierra herméticamente ambas carcasas para evitar la introducción de elementos extraños y la contaminación de la masa viscosa.

La frecuencia natural vertical final del edificio es de 3,28 Hz y la primera frecuencia horizontal (levemente pendular) es de 1,05 Hz. La relación de amortiguamiento horizontal teórica del amortiguador es del 30 %, mientras que la vertical es del 15 %. Debido a que el período propio horizontal del sistema BCS es relativamente bajo, su capacidad de reducir las aceleraciones en la estructura es en general menor que la del sistema LRB, sin embargo los desplazamientos resultantes son favorablemente menores. Respecto de los esfuerzos en miembros estructurales,

las reducciones asociadas a la presencia del aislamiento de base fueron en ambos casos entre el 40 y el 50 % de los valores correspondientes a la estructura rígida para esfuerzos Normales, Cortantes y Flexionales, lo que pone de manifiesto su conveniencia. Los rendimientos aparentemente similares de ambos sistemas en cuanto a la reducción de esfuerzos para las señales sísmicas consideradas, a pesar de las diferentes características de los aisladores, constituye la primera causa del estudio que aquí se realiza.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es analizar los desplazamientos, aceleraciones y esfuerzos en la estructura en función de las diferentes direcciones de excitación horizontal-vertical y la influencia de la rigidez vertical del aislador sobre los esfuerzos de los miembros estructurales, para una familia de sistemas de aislamiento y mediante un análisis paramétrico. Como variables de control para efectuar comparaciones, se eligieron los desplazamientos en la base del edificio, las aceleraciones en el piso superior y los esfuerzos en los miembros estructurales. A tal fin se realizó un estudio paramétrico de la influencia de las rigideces horizontales y verticales del aislador sobre las magnitudes de control utilizando variadas combinaciones de aisladores.

3. CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO

El edificio estudiado forma parte de un grupo de construcciones en la Residencia Estudiantil de la Universidad Tecnológica Nacional en la ciudad de Mendoza, Argentina. Está construido con hormigón armado y mampostería reforzada, utilizando ladrillos cerámicos llenos, tiene dimensiones en planta 8,2 x 8,7 m y una altura de 8,60 m con un peso final de 3200 kN, ver Figura 1. Por razones normativas y comparativas la estructura es idéntica a la de un edificio sin aislamiento construido en su cercanía, con excepción de una viga perimetral a nivel de base, diseñada para alojar a los aisladores. El edificio es de conformación simétrica, con excepción de una leve asimetría respecto del plano XZ, ver Figura 1.

4. MODELOS DE CÁLCULO

A efectos del análisis se confeccionó un modelo de elementos finitos del edificio, mediante SAP 2000[®], con una discretización suficiente para calcular adecuadamente los esfuerzos. Por simplicidad no fue considerado ningún efecto asociado a la interacción suelo-estructura.

El comportamiento del aislador LRB previsto inicialmente puede ser descrito mediante un modelo de ciclo de histéresis de Wen [11] con las siguientes propiedades: rigidez horizontal inicial 9,6 kN/mm, carga de fluencia del núcleo de plomo 118 kN, relación rigidez post-fluencia a rigidez inicial 0,103. La característica principal de este aislador es la no linealidad, ya que la rigidez efectiva depende del desplazamiento, al igual que su período propio y la relación de amortiguamiento. La rigidez vertical del aislador ha sido modelada como constante e igual a 896 kN/mm.

El modelo utilizado para el aislador BCS presenta rigidez y coeficiente de amortiguamiento constante. Los valores nominales de los cuatro conjuntos aisladores son: rigidez horizontal 457 kN/mm, rigidez vertical 34 kN/mm, coeficiente de amortiguamiento horizontal 360 kNs/m, coeficiente de amortiguamiento vertical 180 kNs/mm. El modelo no lineal de histéresis es resuelto habitualmente mediante cálculos no lineales en el dominio del tiempo. A pesar del coeficiente constante, el amortiguamiento viscoso conduce también al mismo tipo de cálculo debido a la no proporcionalidad con la rigidez o con la masa. Es común entonces realizar la integración directa de las ecuaciones de movimiento en un subespacio que contempla un número reducido de modos de la estructura teniendo en cuenta

las fuerzas del aislador (o del amortiguador viscoso), como fuerzas no lineales desequilibradas calculadas en cada paso de tiempo.

Si bien el comportamiento de los aisladores puede ser adecuadamente representado mediante la integración directa de las ecuaciones de equilibrio, este método sólo permite analizar señales determinísticas en el dominio del tiempo. Por esta razón, y por la capacidad de análisis modal que brinda, se ha preferido en este trabajo emplear el método de espectro de respuesta, a pesar de la aproximación final necesaria en la suma modal de los máximos y atento a la posibilidad de obtener conclusiones generales y representar mejor la situación sísmica de diseño mediante envolventes de espectros probables.

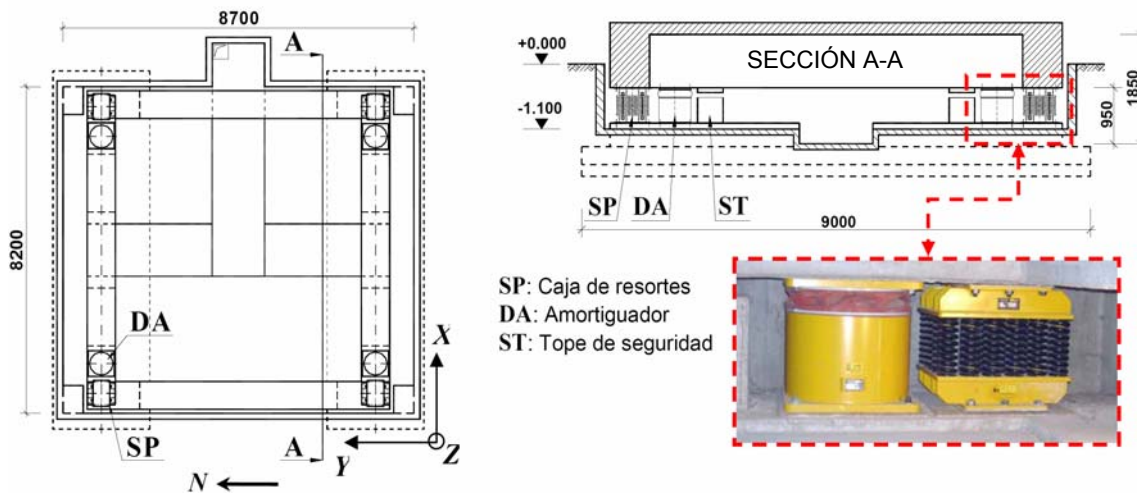


Figura 1 Vista y corte de zona de fundación del edificio aislado.

5. METODOLOGÍA EMPLEADA Y ANÁLISIS REALIZADO

Se desarrolló un programa de cálculo de espectros de respuesta que puede ser alimentado con datos provenientes de un modelo de análisis de elementos finitos y que permite obtener modos, períodos propios, factores de participación modal y esfuerzos modales en miembros estructurales en puntos de interés para los modos considerados. El programa permite considerar distintas relaciones de amortiguamiento modales generadas por el sistema de aislamiento, efectuar un análisis de las componentes modales de cada variable de control y aproximar convenientemente la respuesta no lineal del sistema estructural.

5.1 Señales sísmicas utilizadas

El riesgo sísmico potencial de la estructura fue definido originalmente sobre la base de un estudio de microzonificación [10]. En el presente análisis se consideraron dos sismos reales representativos de los 11 sismos originalmente considerados y además el sismo USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission), con sus componentes horizontal y vertical. Los datos generales de los sismos reales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Datos generales de los terremotos reales considerados.

Nº	Evento	Fecha	Comp.	Mag.	Distancia al Epicen. km	Tipo de Suelo	Durac. seg	PGA g	PGV cm/s	PGD cm	PGA-UP g
1	Kobe - Japón	17/01/95	N-S	6,9	0,60	rígido	15	0,821	81,3	17,7	0,33
2	Tabas - Iran	16/09/78	Transv.	7,4	3,00	compacto	25	0,852	121,4	94,6	0,69

Se consideraron además los espectros de diseño de la norma argentina CIRSOC 103, zona 4. Tanto los espectros verticales de diseño de normas como la componente vertical del sismo sintético USNRC fueron obtenidos adoptando un espectro vertical/horizontal (V/H) según Bozorgnia y Campbell [12] para el caso de suelo firme y distancia epicentral de 60 km. Los espectros V/H están comprendidos entre 0,65 y 0,50 dependiendo del período.

5.2 Casos considerados

Se realiza un estudio paramétrico basándose en aisladores genéricos caracterizados por su rigidez y amortiguamiento horizontal y vertical. Variando la rigidez horizontal de los aisladores se definen tres casos denominados GE, GO y GU (en orden de rigidez decreciente y períodos crecientes), según se muestra en la Tabla 2. En esta tabla T_h y ξ_h representan el período horizontal propio y la relación de amortiguamiento del sistema asociado de 1 GL, mientras que c_v es el coeficiente de amortiguamiento lineal vertical adoptado.

Tabla 2 Modelos con variación de rigidez horizontal.

Modelos variando k_h	k_h [kN/mm]	T_h [s]	c_h [kN s/mm]	ξ_h [%]	c_v [kN s/mm]
GE	4,57	0,83	0,360	30,0	0,180
GO	1,28	1,57	variable(*)	variable(*)	0,092
GU	0,79	2,00	0,072	14,5	0,072

(*): modelo de histéresis, depende de los desplazamientos horizontales

El caso GE representa la rigidez horizontal típica del sistema resorte-amortiguador viscoso BCS, el sistema GO corresponde al período propio del aislador de goma LRB considerado y GU es una versión de aislador elastomérico con período propio más alto. Respecto al amortiguamiento, tanto los casos GE como GU tienen amortiguamiento lineal viscoso, mientras que el caso GO fue considerado con su modelo de histéresis no lineal.

Cada modelo de variación horizontal fue considerado a su vez en varias versiones mediante variaciones en la rigidez vertical de los aisladores. Las variantes verticales han sido resumidas en la Tabla 3. Las frecuencias f_v representan aquí las frecuencias teóricas verticales del sistema asociado de 1 GL. Finalmente en la Tabla 4 se resumen los 18 modelos utilizados. Notar además que el aislador BCS aquí referido corresponde a GE4 y el LRB a GO1.

Tabla 3 Modelos de rigidez vertical.

Modelos variando k_v	k_v [kN/mm]	f_v [Hz]
0	2842	30,00
1	896	16,84
2	316	10,00
3	79	5,00
4	34	3,28
5	20	2,50

Tabla 4 Modelos de aisladores utilizados.

		Período horizontal T_h [s]			
		0,83	1,57	2,00	
		GE	GO	GU	
Frec. vertical f_v	30,00 Hz	0	GE0	GO0	GU0
	16,84 Hz	1	GE1	GO1	GU1
	10,00 Hz	2	GE2	GO2	GU2
	5,00 Hz	3	GE3	GO3	GU3
	3,28 Hz	4	GE4	GO4	GU4
	2,50 Hz	5	GE5	GO5	GU5

5.3 Procedimiento para determinar los amortiguamientos modales

Todos los datos de ingreso al programa de cálculo de espectros de respuesta son obtenidos a partir del programa de elementos finitos, con excepción de los amortiguamientos modales para calcular S_A , S_{SA} y S_D . Mediante un modelo de cuerpo rígido de la estructura apoyada sobre elementos flexibles [13], se calculan utilizando ecuaciones explícitas y en forma aproximada los amortiguamientos modales de los seis primeros modos, llamados modos del aislamiento. El programa fue calibrado y verificado para señales sísmicas en el dominio del tiempo. Posteriormente fue utilizado para extraer conclusiones referidas a la aplicación de los espectros de diseño de la norma sísmica argentina.

5.4 Cálculo de la respuesta espectral amortiguada

Para el caso de las tres señales sísmicas en el dominio del tiempo, los espectros pudieron ser calculados en forma exacta por integral de convolución. Para el caso de cálculos con envolventes de espectros, es posible obtener aproximaciones de $S_{SA}(\xi, T)$ partiendo del espectro para una relación de amortiguamiento del 5% y aplicando un factor de reducción f para amortiguamientos mayores o un factor de amplificación para amortiguamientos menores de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} S_{SA} &= a_0 + (f a_p - a_0) T / T_1 && \text{para } T < T_1 \\ S_{SA} &= f a_p && \text{para } T_1 \leq T \leq T_2 \\ S_{SA} &= \left(1 - (1-f) \frac{T_2}{T}\right) \left(\frac{T_2}{T}\right)^{-c} a_p && \text{para } T > T_2 \end{aligned} \quad (1)$$

donde T_1 es el período al comienzo del plafón, T_2 el período al fin del plafón, a_0 la pseudo aceleración para $T = 0$, a_p la pseudo aceleración del plafón, $c = 2/3$ según CIRSOC 103 y

$$f = 1,5 / (1 + 10\xi) \quad \text{para } \xi > 0,05 \qquad f = \sqrt{0,05/\xi} \quad \text{para } 0,005 > \xi > 0,05 \quad (2)$$

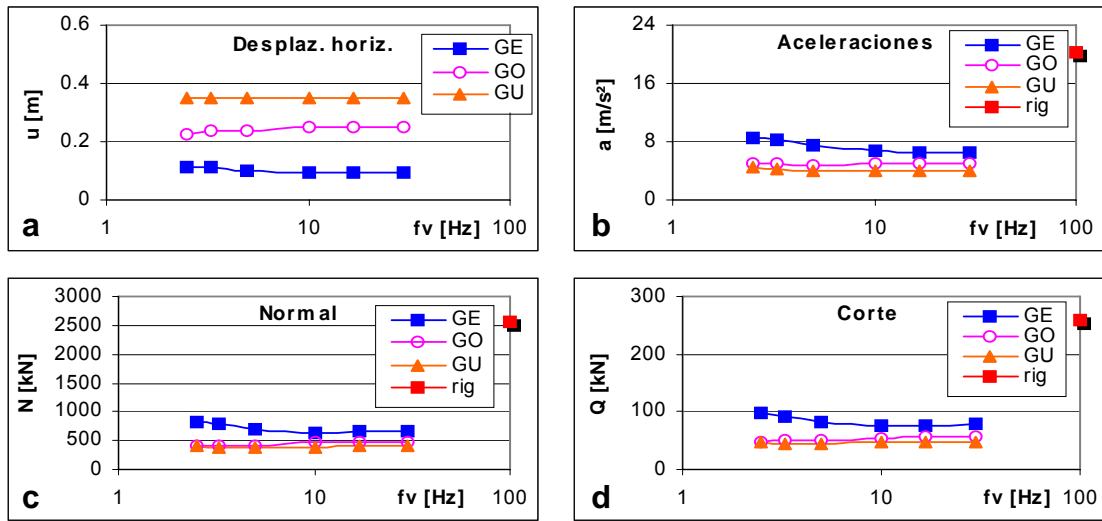
Se consideraron tanto los espectros debidos a aceleración en la dirección horizontal como vertical y ambos fueron corregidos debido al amortiguamiento.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

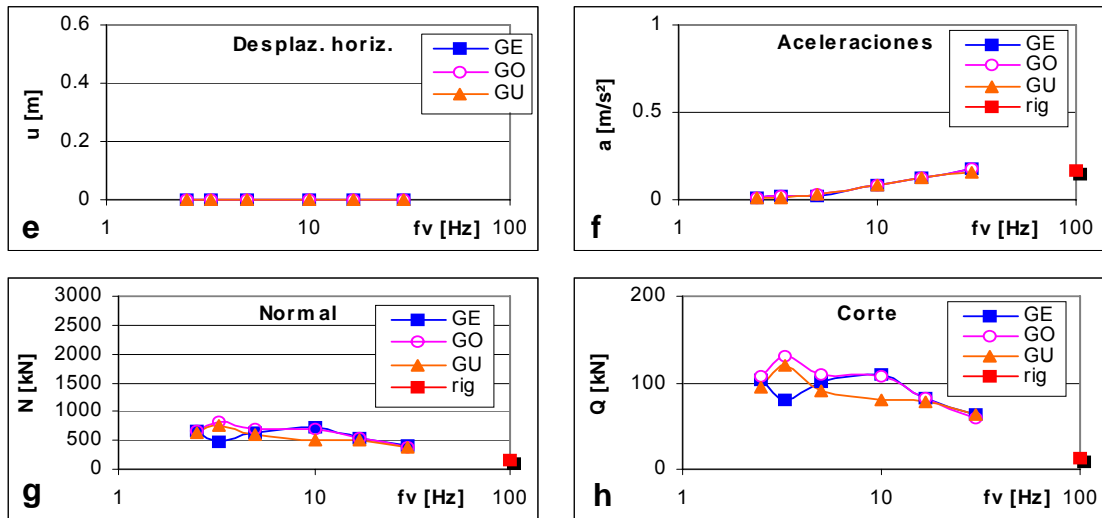
A continuación se muestra un breve resumen de los resultados logrados y condensados en gráficos representativos. Los desplazamientos relativos fueron medidos en un punto de una esquina sobre la base del edificio y en dirección horizontal, mientras que las aceleraciones también horizontales en un punto con igual ubicación en planta pero situado en la azotea. Para el control de los esfuerzos se eligió una columna esquina en la zona inferior directamente por encima de la platea base de la superestructura. Todos los puntos objeto de estudio probaron ser representativos del estado general del movimiento y de los esfuerzos en la estructura. La misma señal horizontal se aplicó simultáneamente en la dirección X e Y.

6.1 Respuesta Sísmica: Desplazamientos, aceleraciones y esfuerzos

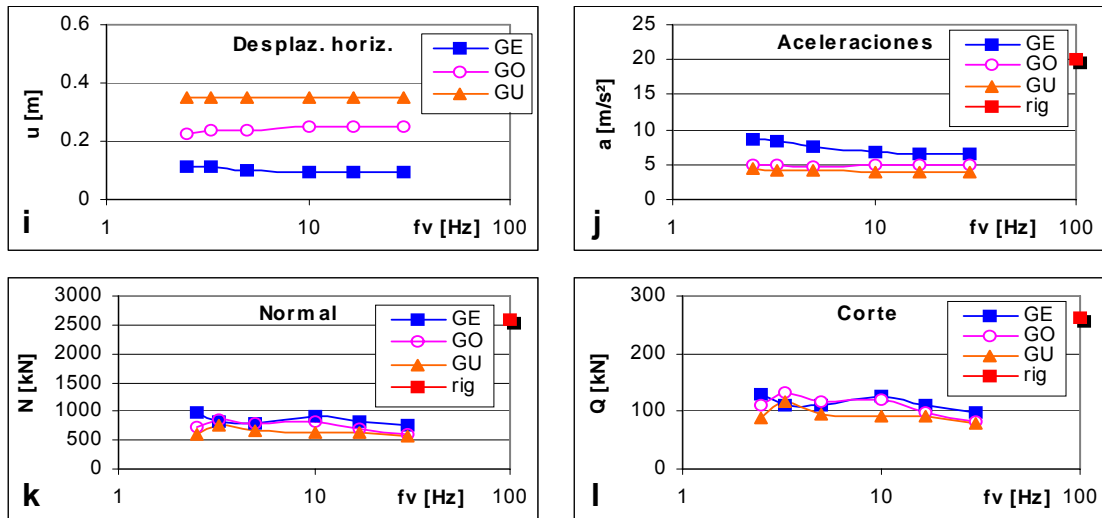
La respuesta estructural calculada mediante espectros de respuesta (RSP) fue comparada con la obtenida por un cálculo no lineal en el dominio del tiempo (IDT), observándose una buena correlación entre las curvas que responden a los dos métodos de cálculo, lo que valida el procedimiento utilizado. La Figura 2 muestra la respuesta RSP al sismo USNRC en sus componentes horizontal y vertical actuando separada y simultáneamente. A la derecha de cada gráfico se indica como caso "rig" el valor obtenido para base rígida (sin aislamiento).



Sismo USNRC, excitación Horizontal



Sismo USNRC, excitación Vertical



Sismo USNRC, excitación Horizontal y Vertical

Figura 2 Desplazamientos, aceleraciones, esfuerzos normales y cortantes, sismo USNRC.

En los gráficos a y b de la Figura 2 se observa que la variación de la rigidez vertical no modifica significativamente la respuesta debida a excitación horizontal en el rango de rigideces considerado; ni los desplazamientos en la base, como tampoco las aceleraciones en la azotea sufren variaciones notables. Por otro lado las variaciones de k_v no modifican la tendencia general que resulta en menores desplazamientos y mayores aceleraciones para rigideces horizontales mayores, representadas por las curvas GU, GO y GE. Las aceleraciones en la azotea se mantienen también acotadas en todos los casos analizados y para un edificio de baja altura como el estudiado, aún cuando se consideren grandes rigideces horizontales y bajas verticales, como en el caso GE5, ver Figura 2b.

Respecto de los esfuerzos debidos a una excitación horizontal mostrados en la Figura 2, gráficos c y d, existe un ordenamiento de las curvas, donde las mayores magnitudes corresponden a los aisladores de rigideces horizontales mayores. Una excepción es el caso GO, cuyo amortiguamiento horizontal para desplazamientos entre 50 a 200 mm. supera el 25 %, lo que produce disminuciones en los esfuerzos y valores comparables a los casos GU de rigidez vertical equivalente.

Para el caso de excitación vertical los desplazamientos horizontales resultan despreciables, ver Figuras 2e. Para esta dirección de excitación existe sin embargo una importante amplificación de los esfuerzos respecto de los generados en el edificio sin aislamiento, con un factor de magnitud varias veces la unidad y dependiendo del sismo, lo que se observa en la Figura 2 en los gráficos g y h. Cuando la rigidez vertical es alta, los esfuerzos tienden a ser independientes de la rigidez horizontal, convergiendo las curvas a un mismo valor. Para rigideces verticales bajas existe una dependencia con la rigidez horizontal por el acoplamiento generado por las asimetrías. Notar que la magnitud de los esfuerzos debido a excitación vertical es del mismo orden y a veces mayor a los generados por excitación horizontal.

La magnitud final de los máximos de los esfuerzos resultan aproximadamente 50 % mayores para el caso de excitación horizontal y vertical simultánea respecto del caso de excitación sólo horizontal, ver gráficos k, l. Nótese que para el caso de edificios aislados, donde las señales verticales son a menudo consideradas poco importantes, la excitación vertical puede jugar un rol preponderante respecto de análisis tensional y muy especialmente para emplazamientos cercanos a fallas geológicas, donde la señal sísmica vertical cobra más importancia relativa. Esta escasa consideración tiene probablemente su origen en el hecho de que los esfuerzos en un edificio sin aislar debido a excitación vertical son verdaderamente despreciables frente a los de su par horizontal, compárese gráficos g y h vs. c y d en la Figura 2.

La Figura 3 muestra los desplazamientos (gráficos a, b, c), esfuerzos normales (gráficos d, e, f) y esfuerzos cortantes (gráficos g, h, i) para el caso de excitación H-V simultánea y considerando los espectros de diseño de norma argentina CIRSOC 103, suelos tipo I, II, III. Nótese que en general las reducciones en los niveles de esfuerzos respecto de los correspondientes al edificio sin aislamiento (indicados como rig a la derecha del gráfico), resultan tan importantes que hacen poco relevantes las diferencias relativas entre casos GE, GO, GU, especialmente para espectros de suelos rígidos (gráficos d, g, con reducciones del 70 %) y menos marcadamente para suelos blandos (gráficos f, i, con reducciones de menos del 50 %). Se destaca el caso límite GE5 como particular, ya que las reducciones se ven muy afectadas por el notable aumento de los espectros de desplazamientos para suelos blandos en los períodos correspondientes a los primeros modos, ver gráficos f, i de la Figura 3. Las conclusiones citadas respecto al sismo USNRC son también aplicables a los sismos de Kobe y Tabas, las figuras correspondientes han sido sin embargo omitidas por razones de espacio.

6.2 Análisis de esfuerzos en función de la rigidez vertical del sistema de aislamiento

Respecto de la contribución modal a los esfuerzos, se verifica que los esfuerzos debidos a excitación horizontal dependen mayoritariamente de los modos pendulares con centro de rotación abajo [13]. Estos modos contribuyen en más del 96 % a los esfuerzos para el caso de excitación horizontal, siendo los porcentajes menores pero aún predominantes para el caso de excitación V-H simultánea. A partir del cálculo con espectros de respuesta se verifica que tanto los esfuerzos modales como los factores de participación de los modos pendulares citados no sufren variación significativa con la frecuencia vertical del aislamiento, lo que justifica la escasa dependencia de los esfuerzos con esa variable.

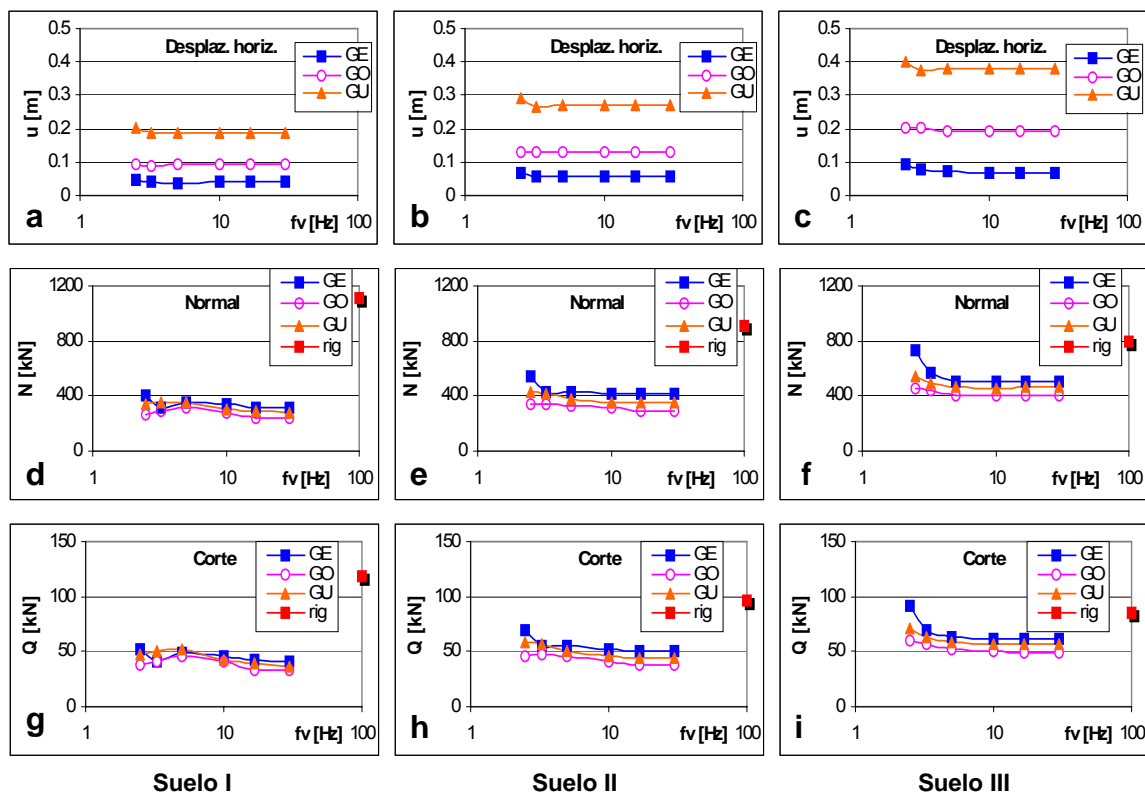


Figura 3 Desplazamientos, esfuerzos normales y cortantes, según CIRSOC 103, excitación horizontal y vertical.

7. CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa de cálculo de respuesta sísmica que alimentado con salidas de programas de elementos finitos permite calcular desplazamientos, aceleraciones y esfuerzos en los miembros estructurales de un edificio con aislamiento de base. El programa utiliza el método de respuesta espectral y determina los amortiguamientos modales del sistema de aislamiento, evitando los cálculos no lineales en el dominio del tiempo que serían necesarios debido a la presencia de amortiguamiento no lineal o no proporcional. Esto permite analizar las contribuciones individuales de cada forma modal considerada.

A través de la incorporación de los espectros de diseño de la norma sísmica argentina se puede predecir en forma rápida la respuesta de distintas configuraciones de aisladores de base, logradas mediante variaciones paramétricas de la rigidez horizontal y vertical.

Para el edificio analizado, se constató una tendencia a obtener menores aceleraciones y mayores desplazamientos para aisladores de rigidez horizontal más bajas, resultando así la selección del

aislador una situación de compromiso entre reducir efectivamente las aceleraciones y acotar los desplazamientos máximos.

Se verifica que para el caso de edificios provistos de aislamiento de base, los esfuerzos generados por la señal vertical pueden jugar un rol preponderante en el estado tensional respecto a los esfuerzos ocasionados por la excitación horizontal, y muy especialmente en el caso de desplazamientos cercanos a fallas geológicas, donde el espectro V/H presenta valores mayores.

La variación de rigidez vertical no modifica sensiblemente la respuesta sísmica en el rango considerado, los desplazamientos y las aceleraciones tampoco sufren variaciones significativas. Las reducciones en los niveles de esfuerzos, respecto de los correspondientes al edificio sin aislamiento, resultan muy significativas para todos los casos analizados, mientras que las variaciones de rigidez tanto horizontal como vertical de los aisladores provocan cambios en los esfuerzos que son poco relevantes. Se exceptúa el caso de aisladores con frecuencias propias verticales muy cercanas a 2,5 Hz y aplicados en suelos blandos. Del análisis paramétrico efectuado queda demostrado y justificado la similar eficiencia en la reducción de esfuerzos de los sistemas BCS y LRB considerados en el proyecto, motivo del presente estudio. En futuras investigaciones se prevé extender el estudio a otras configuraciones geométricas de edificios y ampliar el estudio a otros sistemas de disipación de energía.

8. REFERENCIAS

- [1] M.C. Constantinou, I.J. Tadjbakhsh, The Optimum Design of a Base Isolation System with Frictional Elements, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **12**:203-214, 1984.
- [2] V.A. Zayas, S.S. Low, S.A. Mahin, A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, *Earthquake Spectra*, **6**(2):317-334, 1990.
- [3] J.M. Kelly, *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, Springer Verlag, London, 1993.
- [4] Ministry of Works and Development, *Design of Lead-Rubber Bearings*, Civil Division Publication CDP 818/A, Wellington, New Zealand, 1983.
- [5] F.F. Tajirian, J.M. Kelly, I.D. Aiken, Seismic Isolation for Advanced Nuclear Power Stations, *Earthquake Spectra*, Vol. 6(2), pp. 371-402, 1990.
- [6] N. Mostaghel, M. Khodaverdian, Seismic Response of Structures Supported on R-FBI System, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16** : 839-854, 1988.
- [7] N. Makris, H.S. Deoscar, Prediction of Observed Response of Base-Isolated Structure, *Journal of Structural Engineering*, **122**(5):485-493, 1996.
- [8] P. Nawrotzki, Passive Control Systems for Buildings in Seismically Active Regions, *ECCM-2001, European Conference on Computational Mechanics*, Cracow, Poland, June 2001.
- [9] J.E. Stuardi, Dispositivos Viscoelásticos para Protección Sísmica de Edificios: Residencia Estudiantil en Mendoza, Argentina, XI SIBIS, *Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica*, Mendoza, Argentina, agosto, 2003.
- [10] INPRES, *Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza*, Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Argentina, 1989.
- [11] Y.K. Wen, Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, **102** :249-263, 1976.
- [12] Y. Bozorgnia, K. Campbell, The Vertical-to-Horizontal Response Spectral Ratio and Tentative Procedures for Developing Simplified V/H and Vertical Design Spectra, *Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press*, **8**(2) : 175-207, 2004.
- [13] C.M. Harris, A.G. Piersol, *Harris's Shock and Vibration Handbook*, 5th Ed., Mc Graw Hill, 2002.