

## DEMANDA SÍSMICA EN EDIFICIOS CON AISLAMIENTO SÍSMICO PRÓXIMOS A FALLAS SISMOGÉNICAS CONSIDERANDO PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN A LOS TERREMOTOS

Miguel E. Tornello<sup>a</sup>, Carlos D. Frau<sup>a</sup> y Gioacchini Gustavo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> CeReDeTeC. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional. Rodríguez 273, 5500, Ciudad Mendoza, Argentina, [mtornell@frm.utn.edu.ar](mailto:mtornell@frm.utn.edu.ar), <http://www.frm.utn.edu.ar>

**Palabras Claves:** aislamiento sísmico, terremoto tipo pulso, respuesta estructural, protección sísmica

**Resumen:** En las últimas décadas la ingeniería sísmica ha desarrollado nuevas estrategias para controlar y reducir el daño en los edificios debido a la ocurrencia de fuertes terremotos; entre ellas se encuentra el aislamiento sísmico de base. En las proximidades de las fallas sísmogénicas se pueden presentar efectos de directividad de la ruptura que arroja registros tipo pulsos de gran poder destructivo. Estos registros se caracterizan por contener pulsos de velocidad de larga duración y gran amplitud que llevan a las estructuras a grandes deformaciones y les exige disipar gran cantidad de energía en poco tiempo. El presente trabajo presenta un procedimiento para un diseño preliminar de estructuras con aislamiento sísmico que se emplacen en las cercanías de fallas sísmogénicas que puedan generar registros tipo pulso. El procedimiento se basa en la correlación obtenida entre los parámetros de los pulsos de velocidad de registros impulsivos y la respuesta estructural de edificios con aislamiento sísmico de base en término del cortante en la base. A partir de la magnitud sísmica y la distancia de la construcción a la fuente sísmica, se determinan las características del pulso de velocidad esperado; con dichos parámetros más el período de la estructura con aislamiento sísmico es posible determinar el cortante en la base para el diseño preliminar del sistema de aislamiento. La aplicación de la metodología conduce al trazado de curvas con formato de espectros entre la respuesta estructural y los parámetros que caracterizan al terremoto tipo pulso. Se concluye que el procedimiento presentado resulta sencillo, fácil de aplicar y arroja resultados aceptables para el fin propuesto y para un diseño preliminar de los dispositivos de aislamiento en términos de corte basal.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los registros de terremotos cercanos a la zona de ruptura de la fuente sismogénica resultan significativamente diferentes de aquellos ubicados a cierta distancia. La zona comprendida dentro de una franja de 15 a 20 km a cada lado la traza de la falla se conoce como zona near-fault. Dentro de esta zona, el movimiento del suelo está fuertemente influenciado por el mecanismo de ruptura, la dirección relativa de propagación de la ruptura respecto del sitio y posibles desplazamientos permanentes del suelo (Steward J.P. et al. 2001). Numerosas evidencias indican que el movimiento del suelo cercano a una falla sísmica se caracteriza por ser impulsivo y de corta duración, el cual somete a las estructuras a un alto input de energía.

El fenómeno requiere consideraciones especiales de diseño para las estructuras que se ubican dentro de la región near-fault (Alavi B. y Krawinkler 2001) debido a que el daño estructural, en general, ocurre para uno o dos ciclos severos de deformación inelástica que coinciden con pulsos largos y de gran amplitud de la historia de tiempo de velocidad del suelo. La presencia de pulsos característicos de velocidad puede generar mayores cortes en la base, distorsiones de piso y desplazamientos laterales en comparación con registros que no poseen dichos pulsos. También las demandas de ductilidad pueden ser mucho mayores mientras que el amortiguamiento adicional puede resultar menos eficaz (Malhotra P.K. 1999; Cen Y. et al. 2012; Providakis C.P. 2008). Así, los registros con grandes pulsos de velocidad causan que los modos superiores de vibración tengan una gran participación en la respuesta de edificios altos (Iwan W.D et al. 2000; Calugaru V. y Panagiotou M. 2013).

El aislamiento sísmico se ha presentado como una estrategia adecuada de protección sísmica; así su aplicación a diferentes estructuras se ha acrecentado significativamente en los últimos años. Hoy en día, existen numerosos estudios y aplicaciones relacionadas con las respuestas de estructuras con aislamiento sísmico, sin embargo pocos tienen en cuenta las características particulares de las fuentes sísmicas generadoras del movimiento del suelo cercano a las fallas (Martelli A. 2005; Mazza F. y Vulcano A. 2012). Los desplazamientos de las estructuras aisladas sujetas a terremotos tipo pulso se encuentran fuertemente influenciados por una de las componentes del terremoto debido a que el movimiento del suelo está polarizado (Sharbatdar M.K et al. 2011). Investigaciones sobre estructuras con aisladores elastoméricos sujetas a movimiento impulsivo indican que un aumento del amortiguamiento del dispositivo de aislamiento conduce a menores desplazamientos, distorsiones de piso, fuerzas cortantes, aceleraciones y velocidades (Wolff E. y Constantinou M.C. 2004; Hatzigeorgiou G.D. 2010). Trabajos realizados por Naeim F. y Kelly J. (1999) indican que si se aumenta el amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento se logra reducir el desplazamiento a expensas de mayores valores de aceleraciones y distorsiones de piso. Sin embargo no se indica el parámetro que controla la respuesta cuando el registro posee pulsos largos de velocidad, tampoco se describe cómo controlar las dimensiones del sistema de aislamiento ante la presencia de dichos pulsos.

El presente trabajo presenta un procedimiento para un diseño preliminar de estructuras con aislamiento sísmico cercanas a fallas sismogénicas que puedan generar registros tipo pulso. El procedimiento se basa en la correlación obtenida entre los parámetros de los pulsos de velocidad de registros impulsivos y la respuesta estructural de edificios con aislamiento sísmico de base en término del cortante en la base (Forte A. et al. 2015). A partir de la magnitud sísmica y la distancia del edificio a la fuente sismogénica se determinan las características del pulso de

velocidad esperado; con dichos parámetros más el período de la estructura con aislamiento sísmico es posible determinar el cortante en la base para efectuar un diseño preliminar de los dispositivos de aislamiento.

## 2 CARACTERIZACIÓN DE LOS PULSOS DE VELOCIDAD

Siendo los pulsos de velocidad del suelo los principales causales de las grandes demandas que provocan los registros tipo pulso, distintos investigadores han desarrollado regresiones que permiten obtener los parámetros característicos de los pulsos de velocidad que se esperan ocurran entorno a una falla sísmica. Estas regresiones se han obtenido a partir de la gran cantidad de registros con que cuentan las actuales bases de datos. Asimilando la forma de los pulsos de velocidad a una función seno, los parámetros que caracterizan al pulso son la amplitud máxima del pulso  $Apv$  y su período  $Tp$  (Bray y Rodríguez-Marek, 2004). Si bien, en sentido estricto, la máxima amplitud del pulso de velocidad  $Apv$  puede no coincidir con la velocidad máxima del registro PGV; se observa en registros impulsivos que el PGV, en general, se ubica sobre el principal pulso de velocidad, por lo que en adelante se considerará  $Apv = PGV$ .

Estudios previos han mostrado la dependencia de la amplitud del pulsos de velocidad  $Apv$  respecto de la magnitud momento  $Mw$  y del logaritmo de la distancia más cercana a la fuente sismogénica (Bray y Rodríguez-Marek, 2004; Somerville, 2000; Alavi y Krawinkler, 2001). En particular Mukhopadhyay y Gupta (2013) incorporaron parámetros de directividad a las regresiones proponiendo la ecuación (1) para la amplitud del período del pulso en m/s:

$$\ln Apv = 0.183M_w - 0.118\ln(r^2 + 0.50) + 0.369f_1X\cos\theta + 0.605f_2Y\cos\phi - 1.789 \quad (1)$$

Donde  $Mw$  es la magnitud momento,  $r$  la menor distancia a la falla,  $X$  y  $\theta$  parámetros de directividad del modelo de directividad de Somerville para fallas transcurrentes; en tanto que  $Y$  y  $\phi$  los correspondientes a fallas inversas. Los coeficientes  $f1$  y  $f2$  adoptan los siguientes valores: a) fallas transcurrentes  $f1= 1$  y  $f2=0$ ; fallas inversas:  $f1= 0$  y  $f2=1$  y c) fallas oblicuas:  $f1= 0$  y  $f2=0$ . De acuerdo a Frau C. (2009) para sitios ubicados dentro de la zona near-fault se pueden adoptar para el peor escenario  $X \cos \theta = 0.40$  (fallas transcurrentes) e  $Y \cos \theta = 0.85$  (fallas Inversas); así la ecuación (1) toma la forma de la ecuación (2).

$$\ln Apv = 0.183M_w - 0.118\ln(r^2 + 0.50) + 0.15f_1 + 0.51f_2 - 1.789 \quad (2)$$

En la Figura 1 se han representado las familias de curvas para la amplitud del pulso de velocidad que surgen de aplicar la ecuación (2) para distintas magnitudes sísmicas, variando la distancia a la fuente. Se observa cómo a partir de los 15 a 20 km la amplitud del pulso de velocidad pierde potencia.

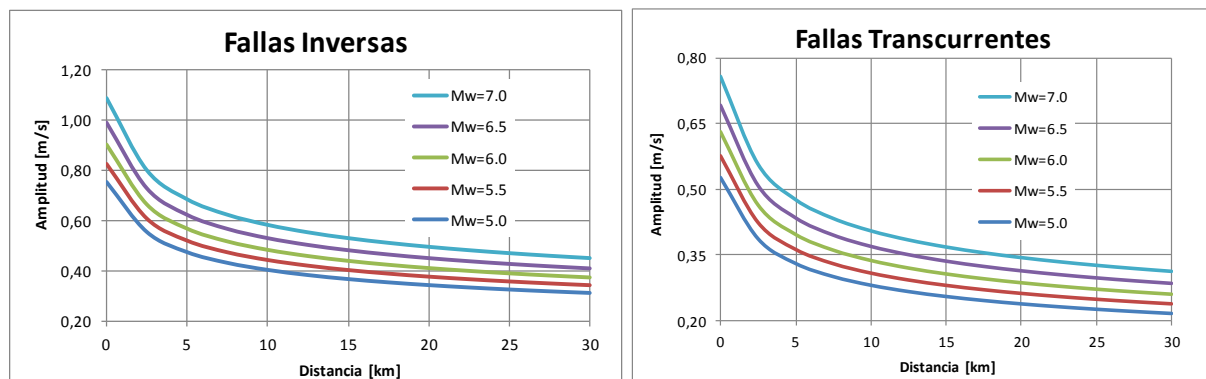


Figura 1: Familias de curvas para la amplitud del pulso de velocidad para fallas inversas y transcurrentes

En cuanto al período del pulso de velocidad resulta una función de la magnitud, así según Baker W. (2007) el período viene dado por la ecuación (3). Esta ecuación es representada en la Figura 2 y como se puede observar no depende de la distancia.

$$\ln T_p = 1.02M_w - 5.78 \quad (3)$$

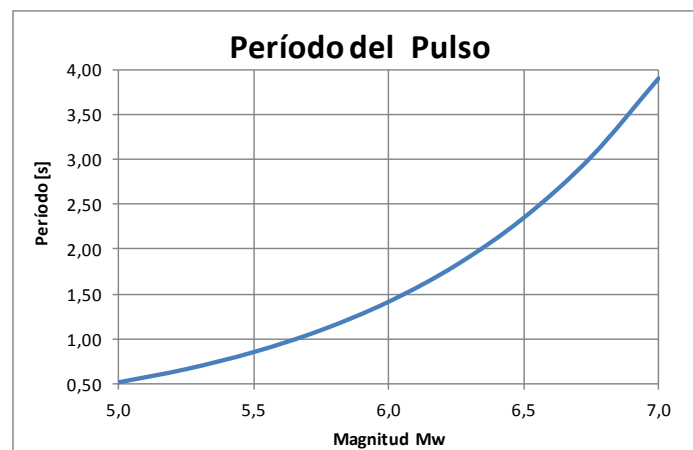


Figura 2: Periodo del pulso vs. Magnitud (Baker W., 2007)

### 3 ESTRUCTURAS CON AISLAMIENTO SÍSMICO

Para el presente estudio se ha seleccionado un edificio de tres niveles con estructura de hormigón armado, muros de mampostería y losas de hormigón armado. Las dimensiones del edificio en planta son de (8,00 x 7,60) m, el peso es de 2570 kN cuando se considera una participación del 25% de la carga viva y de 2910 kN con el 100 % de la misma (Tornello M. y Sarrazín M. 2012).

#### 3.1. Dispositivos de aislamiento sísmico

El sistema de aislamiento está conformado por cuatro paquetes de resortes helicoidales de acero (GCS, Gerb Control Systems®) y amortiguadores viscosos de eje vertical (Gerb Visco®)

(Figura 3 izq.), instalados en cada vértice del edificio. Los dispositivos instalados corresponden al modelo EQ-07 con una capacidad de carga de 921 kN, una rigidez vertical de 35,40 kN/mm y una rigidez horizontal de 4,73 kN/mm. El sistema de aislamiento sísmico presenta como característica una rigidez lineal, tanto horizontal como vertical y un amortiguamiento cuyo comportamiento se aproxima a viscoso. El amortiguamiento de diseño fue del 26% en dirección horizontal y del 13% en dirección vertical; el coeficiente de amortiguamiento Fuerza-Velocidad del amortiguador viscoso se muestra en la Figura 3 (der.).

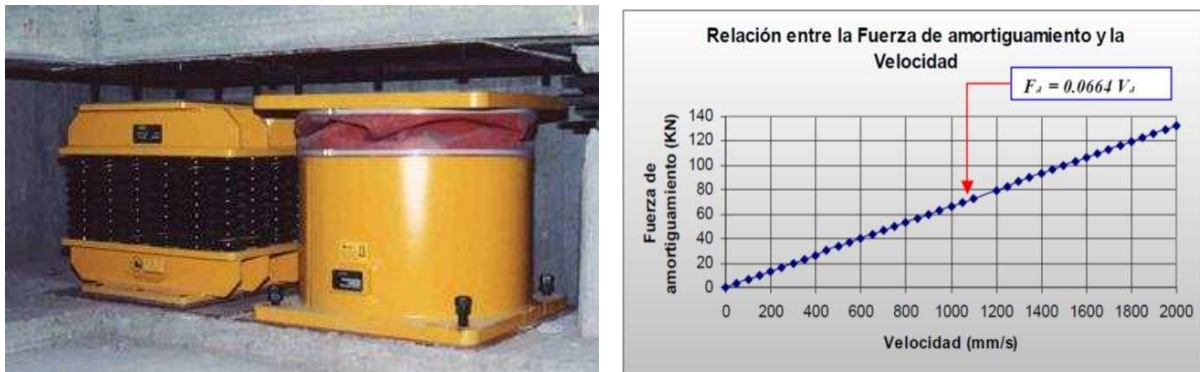


Figura 3 Aisladores sísmico de resortes tipo GCS (Izquierda). Relación Fuerza vs Velocidad (Derecha)

Para cuantificar la influencia de los parámetros que caracterizan a los terremotos en la respuesta del edificio con aislamiento sísmico, se variaron las características dinámicas de los dispositivos con el objeto de contar con tres valores distintos de periodos estructurales:  $Tn_1 = 0.89s$ ,  $Tn_2 = 1.57 s$  y  $Tn_3 = 2.03 s$ .

### 3.2 Análisis Estructural

La respuesta estructural es obtenida mediante un análisis dinámico no lineal en el dominio del tiempo de un modelo espacial del edificio en elementos finitos mediante el software SAP 2000 (CSI Computer and Structures 2003). La no linealidad se concentra en los dispositivos de aislamiento mientras que al edificio se lo considera como un cuerpo de mayor rigidez y elástico. En este caso la fuerza no lineal en el tiempo se analiza por medio de un número reducido de modos estructurales (Stuardi J. et al. 2005). Las respuestas del modelo del edificio se estudia mediante un análisis dinámico tipo *time history non-linear* en el dominio del tiempo.

## 4 REGISTROS SÍSMICOS

Existen distintos parámetros para caracterizar los registros de terremotos, los más utilizados son el PGA, PGV y PGD (valor máximo de aceleración, de velocidad y desplazamiento horizontal del suelo); otros parámetros que se utilizan para representar los registros sísmicos son la aceleración o velocidad cuadrática media, la Intensidad de Arias, la Intensidad de Housner y la aceleración efectiva, entre otras. De acuerdo a lo expresado anteriormente, los parámetros más utilizados para caracterizar los registros tipo pulso son la amplitud máxima y el período correspondientes al mayor pulso en la historia de velocidades del suelo:  $Apv$  y  $Tp$ .

Para el presente estudio se utilizó un set de 91 registros de aceleraciones de campo cercano los que fueron clasificados como tipo pulso por Baker W. (2007). Para ello, Baker rotó las componentes horizontales de los registros de aceleraciones a la dirección normal y paralela a la traza de la falla sismogénica para obtener la dirección de máxima demanda. En cada registro luego de una integración en el tiempo obtuvo la historia de tiempo de velocidad donde a través de la aplicación de la transformada wavelet (onditas) se extrae el pulso de velocidad y así se determina el período del pulso ( $T_p$ ), el pico de velocidad ( $PGV$ ). Dentro del set de 91 registros los  $PGV$  varían entre 40 y 236 cm/s, en tanto que los períodos  $T_p$  oscilaban entre 0.40 y 12.9 s. Recientemente (Panella et al. 2017) desarrollaron un nuevo método de sencilla aplicación para identificar registros tipo pulso; el cual puede ser utilizado para catalogar nuevos registros.

## 5 CORRELACIÓN ENTRE LA EXCITACIÓN SÍSMICA Y LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Para evaluar la respuesta de los distintos casos de estudio, se trabajó con el edificio aislado con los dispositivos previamente descritos (Figura 3) con tres periodos estructurales diferentes que se obtuvieron variando las características de rigidez efectiva, amortiguamiento efectivo, tensión de fluencia y rigidez post fluencia de la constitutiva del aislador de manera de obtener los tres periodos estructurales que fueron estudiados en el presente trabajo ( $T_{n1}= 0.89$ s,  $T_{n2}=1.57$  s y  $T_{n3}=2.03$  s). Como input sísmico se utilizó el conjunto de 91 registros sísmicos con diferentes pulsos de velocidad en cuanto a amplitud y periodo de acuerdo al punto precedente.

A los fines del presente trabajo los análisis se realizaron en una de las direcciones principales del edificio. Para la evaluación de la respuesta en el desarrollo del trabajo se analizaron distintos parámetros tales como desplazamientos, velocidades relativas, velocidades absolutas, aceleraciones absolutas, todas ellas inmediatamente por encima de los dispositivos y para el último nivel del edificio (terrace) como así también cortantes en la base. Para todos los casos los nodos referenciales se ubicaron en el centro de los diafragmas, los cuales fueron considerados rígidos en su plano. Con la finalidad de encontrar correlaciones entre los parámetros de los registros sísmicos y las respuestas estructurales de los edificios, Tornello et al. (2015), se estudiaron distintas combinaciones entre los parámetros de los registros sísmicos y los parámetros de respuestas, tales como: cortante en la base, desplazamientos y aceleraciones versus parámetros de los registros, entre ellos,  $PGA$ ,  $PGV$ ,  $PGV/PGA$  y  $T_p$  entre otros. Los resultados mostraron una dispersión significativa no pudiendo establecerse a priori relaciones confiables entre la respuesta máxima de la construcción con aislamiento sísmico y alguno de los parámetros característicos de los registros sísmicos. Sin embargo, el  $PGV$  y el período del pulso asociado al mismo ( $T_p$ ) mostraban mayor incidencia en la respuesta, especialmente con el cortante basal. De esta manera, se adoptó el  $PGV$  y el  $T_p$  como parámetros para caracterizar la excitación sísmica. En tanto que para evaluar la respuesta estructural se eligió al cortante basal máximo correspondiente al nivel ubicado inmediatamente por encima del sistema de aislamiento.

Si bien en forma aislada el  $PGV$  o el  $T_p$  no logran conformar una correlación clara con la respuesta, se observó, para los casos analizados, una influencia dominante. Por este motivo se procedió a construir una nueva representación gráfica conformada de la siguiente manera: en abscisas el periodo del pulso dividido por el periodo estructural ( $T_p/T_n$ ), en tanto que en

ordenadas se representó el corte basal dividido por el  $PGV$  ( $V_i/PGV$ ), en el presente trabajo las ordenadas deben leerse en [t.s/cm]. Por lo tanto, elegido un sistema de aislamiento con un período y amortiguamiento determinado y sometido a un set de registros, la representación propuesta puede leerse como una especie de espectro que contiene los distintos periodos de pulso ( $T_{pi}$ ). En cuanto a las ordenas para tener en cuenta la influencia de la amplitud del pulso de velocidad en la respuesta se normaliza el cortante máximo por el  $PGV$ . Esta representación se muestra en la **Figura 4** para la estructura analizada y para los tres periodos estudiados.

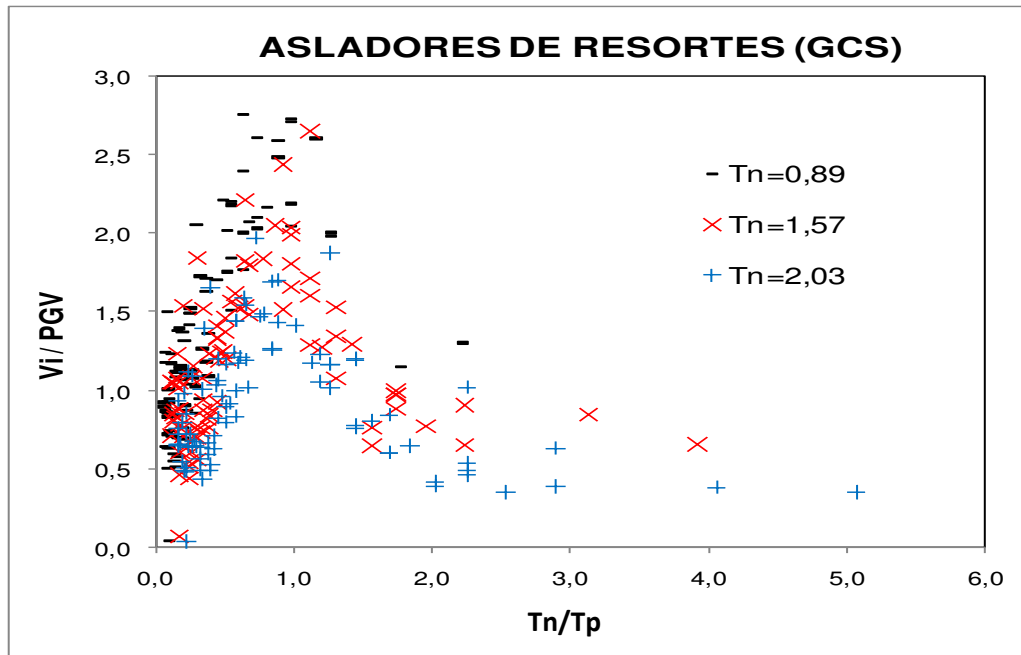


Figura 4. Correlación entre la respuesta de la estructura aislada y las características de los registros sísmicos de falla cercana

Como lo muestra la Figuras 4, cuando los resultados obtenidos se representan en la forma propuesta, éstos adoptan una configuración similar a un espectro de respuesta elástica de aceleraciones. Los puntos presentan su pico alrededor del valor uno para la relación periodo del pulso-periodo estructural. Esta particularidad se repite para todos los periodos estructurales estudiados. Se observa también que a pesar de la gran cantidad de registros utilizadas y el rango de periodos estructurales los parámetros graficados quedan acotados aproximadamente entre 0,30 y 3,0 para el parámetro de respuesta  $V_i/PGV$ . Tal cual lo hacen los espectros de respuesta de aceleraciones la gráfica propuesta también presenta un marcado crecimiento al inicio hasta alcanzar el pico máximo para luego decaer con una ley suave tendiendo asintóticamente a un valor mínimo del orden de 0,20 a 0,50 de ( $V_i/PGV$ ). De esta manera es posible definir un pseudo-espectro de respuesta a pulsos de velocidad de amplitud normalizada para evaluar la respuesta de estructuras aisladas frente a registros sísmicos conteniendo pulsos de velocidad.

A partir de los resultados empíricos obtenidos, es posible encontrar regresiones que permitan un ajuste de los valores para utilizarlas en el diseño. Se evaluaron diversas funciones, una de

ellas es la indicada como ecuación (4). Fue posible verificar que dicha ecuación ajusta bien para prácticamente todos los casos estudiados. La ecuación (5) se expresa en función de los parámetros que relaciona la respuesta con las características del registro de sitio cercano. Si se realiza el ajuste para los casos estudiados, las constantes de la regresión se vuelcan en la [Tabla 1](#).

$$y = \frac{1}{a + bx + c/x} \quad (4)$$

$$\frac{Vi}{PGV} = \frac{1}{a + b \left(\frac{Tv}{Tn}\right) + c/\left(\frac{Tv}{Tn}\right)} \quad (5)$$

Sistema de Aislamiento: Resortes y amortiguadores viscosos			
Valores de las Constantes	Periodos $Tn$ (s)		
	0.89	1.57	2.03
<b>a</b>	-0.2228	-0.5576	-0.9561
<b>b</b>	0.3903	0.6235	0.9043
<b>c</b>	0.2110	0.3765	0.5932

Tabla 1: Valores de las constantes empleadas en la ecuación (5)

En las [Figuras 5](#) se muestran los resultados obtenidos para las regresiones propuestas. Se aprecia una reducción de la respuesta con el incremento del período estructural. Las regresiones se obtuvieron para un amortiguamiento del 26% en dirección horizontal y del 13% en la dirección vertical. Se modificaron las características constitutivas y mecánicas de los dispositivos de aislamiento con el objeto de variar el rango de periodos en un entorno de valores adecuados para las estructuras con aislamiento sísmico. La función propuesta y las constantes determinadas ajustan bien con los resultados mostrados en la [Figura 4](#). De la observación de los resultados es posible afirmar que, para cada periodo estructural, se tornan críticos los pulsos de velocidad de periodo igual al de la estructura, amplificado por la amplitud del pulso, esto es el PGV.



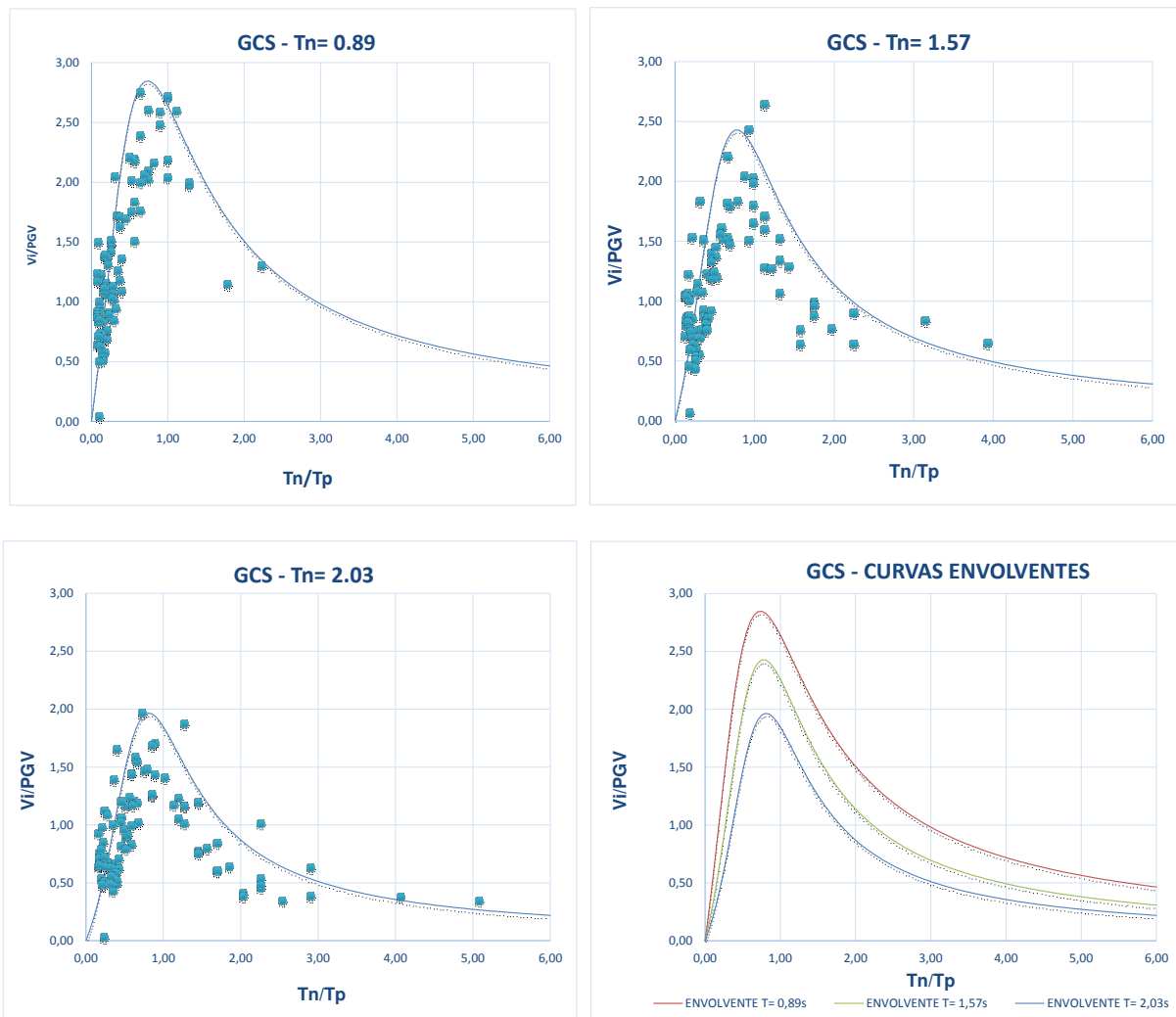


Figura 5. Regresiones propuestas para el sistema de aislamiento de resortes y amortiguadores viscosos para un amortiguamiento del 26% en dirección horizontal y del 13% en dirección vertical.

## 6 METODOLOGÍA PARA UN DISEÑO PRELIMINAR

Con los resultados obtenidos es posible correlacionar los parámetros de amplitud y período del mayor pulso de velocidad de los registros sísmicos con la respuesta estructural en términos de cortante en la base. Para lograr dicho objetivo se describe a continuación el proceso para el prediseño de una estructura con aislamiento sísmico mediante resortes y amortiguadores viscosos que eventualmente se emplace en una zona cercana a una falla sísmogénica. El procedimiento puede resumirse en los siguientes pasos:

- a) Se identifica el tipo de falla sísmogénica y su magnitud máxima capaz.
- b) Se determina la menor distancia entre el emplazamiento de la construcción y la falla.

c) Con las ecuaciones (2) y (3) se determina la amplitud  $Apv$  y período  $Tp = PGV$  del mayor pulso de velocidad esperado; pueden usarse también las Figuras 1 y 2.

d) Con el período del edificio  $Tn$  se calcula la relación  $Tn/Tp$  y se selecciona la curva de período más cercano a  $Tn$

e) Ingresando con la relación  $Tn/Tp$  en la curva correspondiente se obtiene la relación  $Vi/PGV$  (también puede utilizarse la ecuación (4) con las constantes de la tabla 1. Se multiplica este valor por el PGV correspondiente lo que permite obtener el cortante basal para el prediseño del sistema de aislamiento.

A continuación se presenta un ejemplo que ilustra el procedimiento precedentemente detallado. Por ejemplo, para una falla tipo inversa con magnitud máxima capaz  $Mw = 7.0$  que dista 12 km del emplazamiento de la construcción; luego para el edificio en estudio se busca un período objetivo, por ejemplo, 1.50s. Aplicando la ecuación (2) con  $Mw=7.0$ ,  $r=12$  km y  $f1=0$  y  $f2=1$  se obtiene como resultado  $Apv = 0.55\text{m/s} = 55\text{cm/s}$  y  $Tp=PGV=3.87\text{s}$ . Siendo el período objetivo  $Tn=1.5\text{s}$  la relación  $Tn/Tp=1.5/3.87=0.39$ . Aplicando la ecuación (4) resulta  $Vi/PGV=1.58$ . Finalmente se determina el cortante máximo esperado para el prediseño como  $Vi = 1.58*55 = 87 \text{ t}$

## 7 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para el set de 91 registros sísmicos en el estudio de una estructura con aislamiento sísmico de base y con variación de periodos, permitieron definir correlaciones entre los parámetros de respuesta y las características de los registros sísmicos. El set contenía una amplia gama de pulsos de velocidad, tanto en periodos de los pulsos como en amplitudes.

La nueva representación gráfica conformada en abscisas por el periodo del pulso dividido por el periodo estructural ( $Tp/Tn$ ) y en ordenadas el corte basal dividido por el PGV ( $Vi/PGV$ ) [t.s/cm] adoptan una configuración similar a un pseudo-espectro de respuesta elástica de aceleraciones. Los gráficos presentan su pico alrededor del valor uno para la relación periodo del pulso-periodo estructural.

Los resultados obtenidos y la gráfica desarrollada permiten establecer un nuevo procedimiento para el diseño preliminar de aisladores considerando la presencia de pulsos de velocidad característicos de zonas próximas a fallas.

El procedimiento propuesto es de sencilla aplicación y permite contar con un valor de corte en la base del edificio aislado con dispositivos de resortes y amortiguadores viscosos para efectuar un prediseño de los dispositivos de aislamiento cuando la construcción se emplace en zonas próximas a fallas sismogénicas.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido desarrollado dentro del Proyecto de Investigación ECUTIME0004335TC de la UTN, agradeciendo los autores a las autoridades del CeReDeTeC y de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional, por el apoyo brindado en el desarrollo del trabajo.

## REFERENCIAS

- Alavi, B., & Krawinkler, H. (2001). Effects of Near-Field Ground Motion on Building Structures. CUREE-Kajima Joint. Research Program. Phase II.
- Baker, W. (2007). Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motion Using Wavelet Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*(97), 1486-1501.
- Bray, J., & Rodriguez-Marek, A. (2004). Characterization of forward-directivity ground motion in the near-fault regions. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 24, 815-828.
- Calugaru, V., & Pangioutou, M. (2013). Seismic response of 20-story base-isolation and fixed-base reinforced concrete structural wall building at near-fault site. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(6), 927-948.
- Cem, Y., Mustafa, E., & Constantinou, M. (2012). Effect of Near-Field Earthquakes on Seismically Isolated Bridges under B-Directional Loading. 15th WCCE2012. 4109. Lisboa.
- CSI . (2003). Computer and Structures, Inc SAP 2000. V-9. Berkeley, California.
- Forte, A., Garcia, S., Giolo, E., Pagano, D., Frau, C., & Tornello, M. (2015). Incidencia de los parametros que caracterizan a los terremotos tipo pulso en la respuesta sismica de estructuras con dispositivos de aislamiento de base. VIII Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingenieria. EnIDI. San Rafael. Mendoza.
- Frau, C. D. (2009). Espectros de diseño incluyendo efectos de directividad en las regiones near-fault de Argentina. Mendoza: Universidad Tecnologica Nacional. Facultad Regional Mendoza.
- Hatzigeorgiou, G. D. (2010). Behavior factor for nonlinear structures subjected to multiple near-fault earthquakes. *Computers & Structures*, 88(5-6), 309-321.
- Iwan, W. D., Ching-Tung, H., & Guyaner, A. C. (2000). Importance features of the inelastic Structures to Near-Field Ground Motions. 12th World Conference in Earthquake Engineering. New Zealand.
- Malhotra, P. K. (1999). Response of building to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*(28), 1309-1326.
- Martelli, A. (2005). Modern Seismic Protection Systems for Civil and Industrial Structures. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas. Chile.
- Mazza, F., & Vulcano, A. (2012). Effects of near-fault ground motions on the non linear dynamics response of base-isolated R.C. framed buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(2), 690-714.
- Mukhopadhyay, S., & Gupta, V. K. (2013). Directivity pulse in near-fault ground motion-II: Estimation of pulse parameters. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 50, 38-52.
- Naeim , F., & Kelly, J. (1999). Design of Seismic Isolated Structures. Unites States of America: John Wiley & Son, Inc.
- Panella, D. S., Tornello, M. E., & Frau, C. D. (2017). A simple an intuitive procedure to identify pulse-like ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*(94), 234-243.
- Providakis, C. P. (2008). Effects of LRB isolator supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations. *Engineering Structures*, 30(5), 1187-1198.
- Sharbatdar, M. K., Hoseini Vaez, G., & Ghodrati , A. (2011). Seismic Response of Base-Isolated Structures with LRB and FPS under near-fault Ground Motion. *Procedia Engineering*, 14, 3245-3251.
- Somerville, P. G. (2000). Magnitude scalling of near-fault ground motion. *Proceeding of*

- international workshop on annual commemoration of Chi-Chi earthquake, 1, págs. 59-70.
- Steward J.P, Chiou S., Bray J., Graves R., Somerville P., Abrahamson N. (2001). Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design. PEER Report. Pacific Earthquake Engineering Research Centre. College of Engineering University of California, Berkeley., <https://nisee.berkeley.edu/library/PEER-200109/contents.pdf>.
- Stuardi, J., Massa, J., & Brewer, A. (2005). Eficiencia de sistemas de aislamiento sísmico basado en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos comparados con aisladores tradicionales goma-metal. VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional. Buenos Aires.
- Tornello, M., & Sarrazin, M. (2012). Base-Isolated building with high-damping spring systems subjected to near-fault earthquakes. *Earthquake and Structures an International Journal*, 3(4), 315-340.
- Tornello, M., Frau, C., & Pagano, D. (2015). Influence of the parameters characterizing the near-fault earthquake in the seismic response of base isolation structures. 1st Pan American Congress on Computational Mechanics. PANACM. Buenos Aires.
- Wolff, E., & Constantinou, M. C. (2004). Experimental Study of Seismic Isolation Systems with History Analysis Methods. University at Buffalo, State Univ. of New York. Dep. Civil, Structural Environmental Engineering. Tech Report MCRRT-04-001.