

# Capítulo 4

## Terremotos de falla o campo cercano

### 4.1 Introducción

Existen evidencias que indican que la sacudida del suelo cercano a una falla sísmica se caracteriza por un movimiento impulsivo de corta duración que somete a las estructuras a un alto input de energía a pocos segundos de iniciado el movimiento. Este hecho sería poco relevante si se analiza en forma aislada y se admite que las fallas están alejadas de centros urbanos, sin embargo adquiere un tono dramático cuando se piensa que en los últimos años se ha producido un importante crecimiento de áreas urbanas en regiones sísmicamente activas.

Diversas investigaciones realizadas en los últimos años orientadas a evaluar las características de registros de terremotos (Berg, G. et al, 1961; Trifunac, M. et al, 1975; Somerville, P. et al, 1996; Iwan, 1998; Alavi, B. et al, 2000; Baez, J. et al, 2000; Sasani, M. et al, 2000 entre otras) encontraron diferencias importantes entre registros de movimientos asociados a fallas cercanas de aquellos provenientes de fuentes más alejadas. Dichas diferencias implican una respuesta estructural distinta según sea la distancia a la fuente.

Uno de los primeros trabajos de investigación (Bertero et al, 1976) determinaron que existían registros de terremotos que evidenciaban la presencia de pulsos de velocidad de larga duración, designados "*pulsos largos*". Los mismos imponían desplazamientos importantes y, en muchos casos, permitieron explicar los mecanismos de falla de algunas estructuras ubicadas en proximidad a la fuente.

Después del terremoto de San Fernando de 1971 la importancia de los pulsos largos de velocidad sobre la respuesta estructural ha sido señalada por distintos trabajos de investigación (Bertero, 1976, Mahin, 1977). Luego del terremoto de Imperial Valley en 1979, Anderson y Bertero (1987) identificaron al aumento de velocidad como un importante parámetro que afecta la máxima respuesta inelástica de estructuras sometidas a terremotos de falla cercana.

Como resultado de los terremotos de Northridge (1994) y Hiogo-Ken Nambu (Kobe, 1995), el código norteamericano UBC-1997 ha introducido factores que tienen en cuenta el efecto de falla cercana. Los mismos varían entre 1.0 y 2.0 según sea el tipo y la distancia a la falla sísmica, lo que indica claramente que el fenómeno de falla cercana ha sido reconocido. En consecuencia y sobre la base de distintos trabajos de investigación, se ha establecido una marcada diferencia entre las respuestas esperadas para los terremotos de falla cercana y aquellos cuyos focos se ubican a mayor distancia.

Los estudios realizados por Heaton T. H., et al en 1995 sobre la respuesta de los sistemas de aislamiento sísmico sometidos a terremotos de falla cercana, han puesto en duda la implementación del aislamiento sísmico en edificios emplazados próximos a la falla. Por otro lado dichas investigaciones fueron tomadas por el código norteamericano UBC en su versión 1997, de tal manera que cuando se realiza el diseño de sistemas de aislamiento, emplazados en zonas cercanas a la falla, los mismos conducen a resultados por demás conservadores (UBC, 1997).

Sin embargo otras investigaciones (Jangid, R. S., et al, 2001; Maden G. et al, 2001) determinaron que si se controlan algunos parámetros de diseño de los sistemas de aislamiento la respuesta de los mismos, frente a terremotos de falla cercana, puede ser eficiente y satisfactoria.

La falta de instrumentación sísmica que existió durante muchos años concluyó en investigaciones con pocos registros de baja magnitud provenientes de estaciones registradoras distantes del epicentro. Por lo tanto, aspectos propios de terremotos altamente destructivos no pudieron visualizarse debido a que no se contaba con la información necesaria. En los últimos 20 años se han producido, en regiones de elevada peligrosidad sísmica, importantes terremotos en los que se registraron acelerogramas en zonas epicentrales. Entre los más relevantes se pueden citar los de Loma Prieta, EEUU, 1989; Landers, EEUU, 1992; Northridge, EEUU, 1994; Kobe, Japón, 1995; Chi Chi, Taiwan, 1999; Duzce, Turquía, 1999 (Frau et al, 2005).

El oeste de la República Argentina cuenta con importantes conglomerados urbanos, entre ellos el Gran Mendoza, ubicados en las proximidades de fallas activas que los exponen al fenómeno de terremotos de campo cercano (Ver Capítulo tres). Los pocos registros

disponibles dan cuenta de la presencia de este fenómeno. La escasez de datos puede ser salvada, dentro de ciertos límites, por registros del oeste de los Estados Unidos (Saragoni, 2004).

## **4.2 Actividad sísmica superficial. Fuentes potenciales**

En el capítulo tres se ha tratado en forma extensa las distintas características y parámetros que controlan la actividad sísmica del Gran Mendoza. Sin embargo es importante reiterar, a los objetivos del presente capítulo, las fuentes potenciales de la actividad sísmica superficial asociadas a fallas geológicas e identificadas como fallas activas, es decir aquellas que tienen un mayor potencial de generar terremotos. En la Fig. 4.1 se indican las fuentes sísmicas potenciales del oeste argentino y en particular las asociadas a la zona norte de la provincia de Mendoza, en ella puede observarse un alineamiento importante de la falla “Cerro la Cal” con la ciudad. Algunas investigaciones sobre geología regional realizados en la zona (Mingorance, 2001) concluyeron que la citada falla se prolonga hacia el interior de la ciudad de Mendoza a través de calle Perú.

Por lo tanto y de acuerdo a los antecedentes de la región, es probable que sismos con fuentes provenientes de fallas activas emplazadas en la zona, presenten los efectos de campo cercano. En la tabla 4.2 se resumen las características fundamentales de las fuentes sísmicas potenciales de las fallas indicadas en la Fig. 4.1 (Frau et al, 2005).

Próximo a la antigua estación ferroviaria de Capdevila se reconoce la falla del Cerro la Cal (también conocida como falla Salagasta). La misma es una falla inversa con buzamiento al este y trazo levemente sinuoso que puede reconocerse en el terreno por una longitud de 32 Km. (Fig. 4.3 y 4.4). La sección sur de su trazo se encuentra dentro del radio urbano de la ciudad de Mendoza por lo tanto, representa la fuente sísmica más crítica en cuanto a la potencialidad del daño.

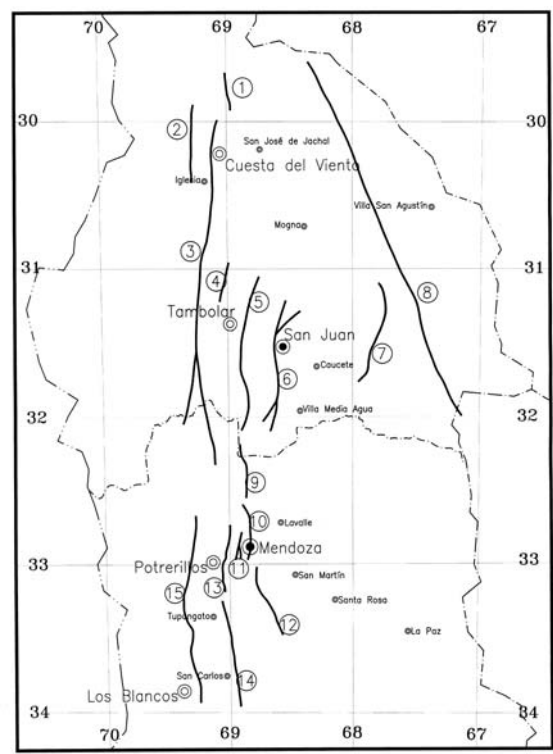


Fig. 4.1: Emplazamiento de las fuentes sísmicas potenciales del centro oeste argentino (Fuente: Frau et al, 2005).

Nº	Fuente Sísmica	Terr. Pot. Máx.		Terremoto Histórico Asociado
		Magnitud [Ms]	Recurr. [años]	
Fallas				
1	Punilla-La Bolsa (SJ)	7,6	900	27 Oct. 1894, Ms=7,5
2	Pismanta (SJ)	7,3	4000	-
3	El Tigre (SJ)	7,8	1250	-
4	La Cantera (SJ)	6,9	5000	19 Mar. 1924, Ms=6,2
5	Maradona-Deheza (SJ)	7,3	8000	11 Jun. 1952, Ms=7,0
6	Precord. Oriental (SJ)	7,5	400	15 Ene. 1944, Ms=7,4
7	Ampacama (SJ)	7,8	4000	23 Nov. 1977, Ms=7,4
8	Valle Fértil (SJ)	7,0	3000	-
9	Los Cerrillos (MZA)	7,5	5000	-
10	Cerro La Cal (MZA)	7,0	1300	20 Mar. 1861, Ms=7,0
11	Cerro de la Gloria (MZA)	6,5	10000	-
12	Barrancas (MZA)	7,0	600	26 Ene. 1985, Ms= 5,9
13	Melocotón (MZA)	7,0	4000	22 May. 1785, Ms=7,0 ?
14	Tupungato (MZA)	7,0	1000	-
15	Cordillera Frontal (MZA)	7,7	5000	-
Zonas				
1	Subducción	7,5	500	14 Abr. 1927, Ms=7,1
2	Sureste San Juan	6,0	200	-
3	Noreste de Mendoza	6,0	200	17 Dic. 1920, Ms=6,0
4	Chile Central	8,5	100	11 Nov. 1922, Ms= 8,4

Tabla 4.2: Características fundamentales de las fuentes sísmicas potenciales del centro oeste argentino (Fuente: Frau et al, 2005).



Fig. 4.3: Emplazamiento de la falla del cerro de la Cal en relación al Gran Mendoza. (Fuente: Servicio geológico minero argentino, 2002)



Fig. 4.4: Foto aérea de la traza de la falla del Cerro de la Cal. (Fuente: Servicio geológico minero argentino 2002)

La localización de la falla Cerro la Cal en el sector urbano de Mendoza se indica en la Fig. 4.5 y la misma es coincidente con la ubicación de las vías del ferrocarril ex General San Martín y con la de calle Perú. Su morfología original se encuentra modificada por la urbanización, sin embargo el quiebre topográfico es claramente notable (Servicio geológico minero argentino, 2002). Distintos autores (Bastias et al, 1993; Mingorance, 2000) reconocieron la existencia de evidencias de desplazamientos recientes y probablemente vinculados al terremoto de 1861 (Tabla 3.17 del capítulo tres). Las características geométricas de las fallas indican que una eventual ruptura de la misma en el futuro se iniciaría en el sector NO de la misma y terminaría prácticamente en el sector urbano de la ciudad de Mendoza (Mingorance, 2000c).



*Fig. 4.5: Localización de la traza de la falla Cerro la Cal (línea continua) en el sector urbano de la ciudad de Mendoza. Con línea de trazos se indica la zona de peligro de desplazamiento superficial (Adaptado de Mingorance 2000 a ) (Fuente: Servicio geológico minero argentino, 2002).*

### **4.3. Características más relevantes de los terremotos asociadas a falla cercana**

#### **4.3.1. Dirección de ruptura**

La zona de falla cercana considera una franja a lo largo de la misma con un ancho que se extiende entre los 15 a 20 Km. a cada lado de la falla. En dicha zona se manifiestan las características de los efectos cercanos a la fuente dado que, el movimiento del suelo está fuertemente influenciado por el mecanismo de ruptura de la falla, la dirección relativa de propagación respecto del sitio y posibles desplazamientos permanentes del suelo como resultado del deslizamiento de la falla (Frau et al, 2005). Estos efectos han sido designados por algunos investigadores “*Directividad*” (rupture-directivity) y desplazamiento permanente del suelo (fling step) (Stewart et al, 2001).

El efecto de dirección (*Directividad*) de ruptura puede manifestarse en dos formas (Frau et al, 2005). Efecto de ruptura hacia delante (*forward rupture directivity*) o hacia atrás (*backward rupture directivity*).

La dirección hacia delante ocurre cuando la ruptura se propaga hacia el sitio y el sentido de deslizamiento de la falla está alineada con él. En las proximidades de la fuente la velocidad de ruptura de la falla es cercana (en general levemente inferior) a la velocidad de la onda de corte en la roca.

Cuando el frente de ruptura se aleja del hipocentro y se aproxima al sitio, la energía se va acumulando en el frente de ruptura en cada sucesivo deslizamiento de la falla (según la distribución de barreras y asperezas del plano de falla). Así, el frente de ondas llega al sitio como un gran pulso de movimiento (*shock wave effect*) que generalmente ocurre al inicio del registro. Este pulso de movimiento se caracteriza por su gran amplitud, periodo intermedio a largo y corta duración (Somerville and Smith, 1996-b; Somerville et al. 1997).

Si el sitio está ubicado cerca del epicentro y la ruptura se propaga alejándose de él, la llegada de las ondas sísmicas se distribuyen en el tiempo. Esta condición es conocida como dirección de ruptura hacia atrás y se caracteriza por movimientos de relativamente larga duración y baja amplitud. El esquema de la Fig. 4.6. muestra cómo se genera el efecto de dirección de ruptura hacia delante (Frau et al, 2005).

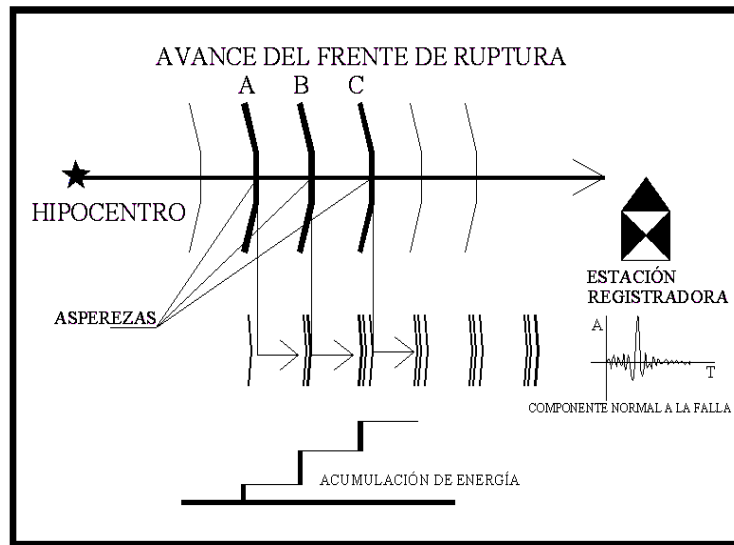


Fig. 4.6. Dirección de ruptura hacia delante (forward directivity). (Fuente: Frau et. al, 2005).

Los efectos de “dirección” se dan tanto en fallas de desgarre como en fallas normales o inversas. La diferencia en la historia de las aceleraciones en algunos casos puede no resultar evidente, sin embargo examinando la historia de las velocidades y desplazamientos las mismas revelan la naturaleza especial del movimiento de pulso característico. El PGV es sustancialmente mayor que en los registros normales. En la Fig. 4.7 se muestra el efecto de dirección a través de la historia de velocidades del suelo para el terremoto de Landers de 1992 (Frau et. al, 2005). En dicha figura se observa que la estación Lucerne presenta claramente dirección hacia delante mientras que la estación Joshua Tree hacia atrás.

Por lo tanto del tratamiento del presente tema se concluye que si el emplazamiento del edificio, con sistemas de aislamiento sísmico, se encuentra emplazado a una distancia menor de 15 a 20 Km. de una falla activa (en el caso del emplazamiento del edificio, falla del Cerro la Cal – Calle Perú ó Falla del Cerro de la Gloria, Fig. 4.1 y 4.3) es necesario considerar los efectos cercanos a la fuente fundamentalmente, porque el movimiento del suelo estará fuertemente influenciado por el mecanismo de ruptura de la falla y la dirección relativa de propagación respecto del sitio.

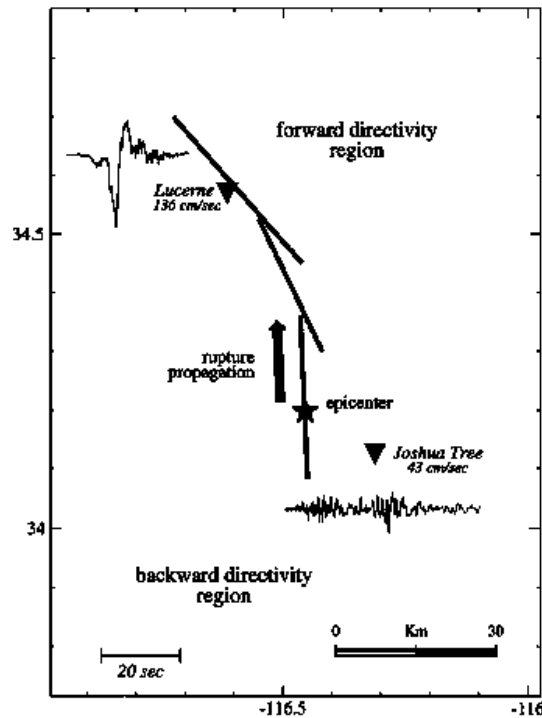


Fig. 4.7. Dirección hacia delante y hacia atrás en el terremoto de Lander, 1992. Somerville, 1997. (Fuente: Frau et. al, 2005).

#### 4.3.2. Orientación del pulso

En fallas transcurrentes e inversas, los patrones de radiación de la dislocación de corte provoca que el pulso de movimiento esté orientado perpendicularmente al deslizamiento de la falla. El desplazamiento estático ocurre luego de algunos segundos respecto de cuando se desarrolla la ruptura en la dirección del deslizamiento de la falla, por lo tanto no está fuertemente acoplado con el desplazamiento dinámico referido al pulso y causado por el efecto de dirección hacia delante (Frau et. al, 2005).

En fallas de desgarre la ruptura puede propagarse en uno o dos sentidos a lo largo del plano de ruptura. El deslizamiento es horizontal, en dirección de la traza, por lo tanto el desplazamiento permanente se presenta paralelo a la falla. En fallas de tipo normal o inversa el deslizamiento de la falla ocurre en la dirección del buzamiento por lo tanto, dicho desplazamiento permanente se ubica por encima del hipocentro (Frau et al, 2005).

En fallas transcurrentes la orientación del pulso se presenta en la dirección perpendicular a la traza de la falla, mientras que el desplazamiento estático o permanente se da en la dirección paralela. Para fallas inversas o normales, tanto la dirección del pulso como el desplazamiento permanente se presentan en dirección perpendicular a la traza de la falla. En la Fig. 4.8 se



indica la orientación del pulso dinámico y del desplazamiento estático para fallas transcurrentes (strike fault) y fallas normales o inversas (dip fault) (Frau et al, 2005).

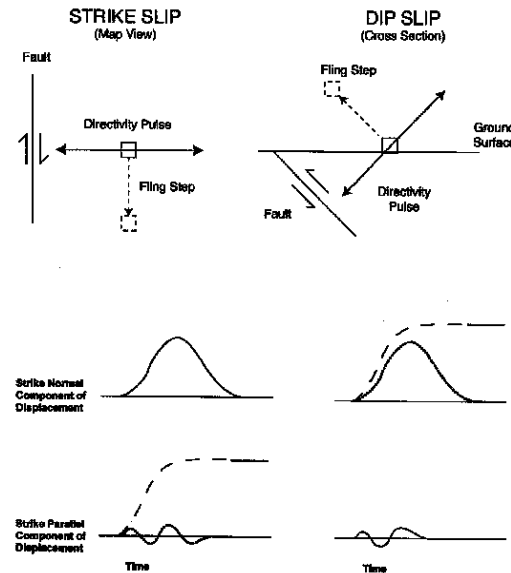


Fig. 4.8. Dirección del pulso dinámico y del desplazamiento permanente (Somerville, 1997).  
(Fuente Frau et al, 2005)

Otra característica de las zonas próximas a la falla es el hecho de que las aceleraciones del suelo presentan valores máximos horizontales superiores a lo que predicen las relaciones de atenuación para una determinada región y para distancias mayores a 30 Km. (Somerville et al, 1996-a; Ruiz y Saragoni, 2004).

Los tipos de fallas que se presentan en la zona del Gran Mendoza son del tipo normales o inversas (Microzonificación sísmica de la ciudad de Mendoza, 1989). En consecuencia del tratamiento del presente punto se concluye que para dichas fallas la dirección del pulso y el desplazamiento estático se presentan en dirección normal a la traza de la falla. La falla del Cerro la Cal – Calle Perú (la más próxima al emplazamiento del edificio con aislamiento) presenta su traza con una dirección predominante norte-sur, por lo que el pulso de mayor velocidad y desplazamiento deberá esperarse en la componente oeste-este de los registros. En los análisis de la historia en el tiempo, para evaluar la respuesta del edificio con aislamiento sísmico, debe necesariamente considerarse las dos componentes horizontales de los acelerogramas de tal manera de detectar la presencia de los pulsos de velocidad y desplazamientos en la respuesta de la estructura.

### 4.3.3. Caracterización de los terremotos de campo cercano

Para definir la capacidad destructiva de los terremotos pueden utilizarse distintos parámetros de los acelerogramas (aceleración máxima, aceleración efectiva, intensidad de Housner, intensidad de Arias). Uno de los parámetros que mejor correlaciona el daño observado en las estructuras reales es el definido por Araya y Saragoni (1984). En el mismo interviene en forma directa la cantidad de cruces por cero que presenta el acelerograma, por lo tanto, se pondera la longitud de los pulsos de aceleración. El potencial destructivo se ha definido como:

$$P_D = \frac{\pi}{2g} \frac{\int_0^{t_0} \ddot{u}_g^2(t) dt}{v_0^2} \quad (4.1)$$

En la ecuación (4.1) “ $v_0$ ” es el número de cruces por cero por segundo o intensidad de cruces por cero del registro de aceleraciones, “ $\ddot{u}_g$ ” es la aceleración del suelo, “ $t_0$ ” es la duración del registro y “ $g$ ” la aceleración de la gravedad. Como se desprende de la citada expresión la capacidad de producir daño o colapso estructural está en función inversa del cuadrado de la intensidad de cruces por cero del acelerograma y en proporción directa a la Intensidad de Arias.

En zonas de falla cercanas, los efectos de “dirección” producen acelerogramas con pulsos largos de aceleración y por lo tanto con una baja intensidad de cruces por cero. Por lo tanto es posible entender el mayor poder destructivo de los terremotos cercanos a la fuente, los mismos presentan intensidades de cruces por cero del orden de 6 a 8 mientras que los terremotos de interplaca subductivos arrojan valores que oscilan entre 12 y 20 (Saragoni y Rojas, 2000). Los principales registros de los terremotos de Mendoza de 1985 y San Juan de 1977, contienen intensidades de cruces por cero del orden de 6 a 8 lo cual demuestra la capacidad del “ $P_D$ ” para identificar registros con características de campo cercano y su potencial de daño (Frau et al, 2005).

Para seleccionar los terremotos asociados a fallas cercanas, a utilizar en el análisis de la respuesta del edificio con aislamiento de base, el factor que caracteriza el potencial destructivo del acelerograma es un parámetro interesante e importante a tener en cuenta.

La disminución de la profundidad de foco, tanto en fallas transcurrentes como inversas, provoca que el movimiento del suelo se torne más severo con importantes amplitudes de las ondas de superficie. La velocidad de ruptura amplifica las ondas de corte en fallas transcurrentes y de las ondas Rayleigh en fallas del tipo normales o inversas, lo que provoca un incremento de la amplitud del pulso de desplazamiento y de velocidad, mientras se estrechan los anchos de los pulsos (Agaard B. et al, 2001).

Los movimientos de falla cercana presentan una moderada sensibilidad al pico de desplazamiento. Si el mismo aumenta, se incrementa el pico de velocidad y ello provoca una mayor amplitud del desplazamiento el cual influye en la amplitud del movimiento, pero no en la forma de las ondas. Por lo tanto cuando se realizan diseños en ingeniería es importante tener cuidado en la selección de los parámetros que controlan el movimiento de falla cercana: profundidad de la falla, velocidad de ruptura, pico de la tasa de deformación de la falla y velocidad media de deslizamiento (Agaard B. et al, 2001).

Registros digitales de movimientos cercanos a la falla (Turquía, 1999; Taiwán, 1999) contienen desplazamientos permanentes del suelo debidos a las deformaciones estáticas del terreno. Dichos desplazamientos estáticos ocurren luego de algunos segundos de producido el deslizamiento y en la dirección de movimiento de la falla, en consecuencia no está fuertemente acoplado con el desplazamiento dinámico (Stewart, J., et al 2001).

La variación espacial de los efectos de “*dirección*” depende del ángulo que forma la línea de ruptura con la dirección de propagación de las ondas viajando desde el foco al sitio y de la porción de ruptura que se encuentra entre el foco y el sitio. Dichos efectos de “*dirección*” resultan más significativos cuando menor es el ángulo descrito. Por lo tanto es de notarse que aunque se verifiquen las condiciones para el efecto de “*dirección*” hacia delante, es posible que el fenómeno no ocurra (Stewart, J., et al 2001).

Los terremotos de Turquía y Taiwán han puesto de manifiesto la importancia de las deformaciones permanentes del suelo asociadas a la superficie de ruptura. Dichas deformaciones permanentes, como resultado de un desplazamiento estático del suelo, están generalmente caracterizadas por un pulso de velocidad unidireccional y un paso monotónico en la historia de desplazamiento del suelo. Dicho paso monotónico y discreto ocurre en dirección paralela al plano de deslizamiento de la falla (Stewart, J., et al 2001).

#### **4.3.4. Influencia sobre los espectros de respuestas**

Los efectos de “dirección” de los terremotos asociados a falla cercana, ya tratado en el punto 4.3.1 del presente capítulo, influyen sobre los espectros de respuesta. Debido a que el movimiento se polariza fuertemente en la dirección normal a la falla, las ordenadas espectrales para la componentes normal y paralela a la misma son muy diferentes. Además las ordenadas espectrales medias son generalmente mayores que para casos en los que no se presenta el efecto de “dirección” (Frau et al, 2005).

Algunas investigaciones (Somerville et al, 1997) desarrollaron modificaciones a las relaciones empíricas de atenuación para incorporar las condiciones promedio de la dirección de ruptura. Dichas modificaciones, basadas sobre un análisis empírico de datos de fallas cercanas y verificados usando una amplia gama de terremotos artificiales, conducen a que las componentes del movimiento normal y paralela a la falla difieren una de otras para periodos mayores a 0.5 seg., sin embargo dichas diferencias dependen de la magnitud y la distancia.

La dependencia de la relación falla normal a la respuesta promedio de la aceleración espectral es función de la magnitud y de la distancia, mientras que la influencia del tipo de falla y las condiciones del sitio no son significativas. El mismo trabajo (Somerville et al., 1997) encontró que para periodos mayores de 0.5 segundos la relación crece con el aumento de la magnitud y el decrecimiento de la distancia. Las mayores relaciones ocurren hasta los 10 Km. de distancia. En general las relaciones son mayores con el aumento del periodo y hasta los 5 seg., valor a partir del cual presenta una tendencia asintótica para cortas distancias y grandes magnitudes.

Estas características, particulares de los terremotos asociados a falla cercana, imponen ciertas limitaciones a los espectros de respuesta como herramienta de trabajo. Actualmente los códigos especifican terremotos de diseño mediante el uso de espectros de respuesta. Sin embargo existe un reconocimiento que el sólo espectro no provee una adecuada caracterización de movimientos de falla cercana.

En los terremotos de fuentes próximas, los movimientos son caracterizados por unos pocos pulsos simples, de periodo largo y de corta duración, en vez de un movimiento estocástico de larga duración como se presentan en terremotos de fuentes más alejadas. En terremotos de

falla cercana el “input” es tipo pulso y no da suficiente tiempo para ser capturado por el espectro de respuesta por lo tanto, no es capaz de representar adecuadamente la demanda sísmica del pulso (Frau et al, 2005). Análisis de la respuesta no lineal en el tiempo de sistemas simples (Frau y Silva, 2003) muestran que prácticamente no existen ciclos de respuesta inelástica para registros de falla cercana y que la respuesta se limita a uno o dos incursiones plásticas para luego continuar vibrando con muy pequeñas amplitudes alrededor de un gran desplazamiento plástico no admisible para estructuras reales.

Trabajos realizados por Malhotra P. K. (1999) sobre espectros de respuesta de terremotos de falla cercana encontraron que, para el espectro de respuesta elástica, las amplificaciones espectrales de periodo corto son sensibles a la aceleración (PGA), mientras que los de periodo largo son sensibles al desplazamiento (PGD). Con relación a los espectros de respuesta elásticos suavizados, la amplificación espectral de las distintas regiones depende de los valores de PGA, PGV, PGD, mientras que el ancho de las regiones depende las relaciones entre dichos parámetros. Por ejemplo un mayor valor de la relación (PGV/PGA), conduce a ensanchar la zona sensible a las aceleraciones y un mayor valor de (PGD/PGV), a alargar la zona sensible a los desplazamientos.

En la tabla 4.9 se observan las relaciones (PGV/PGA) y (PGD/PGV) para algunos terremotos de falla cercana estudiados, mientras que en la tabla 4.10 se indican los valores de periodos hasta donde extender la zona sensible a las aceleraciones (Malhotra P. K.,1999).

*Tabla 4.9: Relaciones de (PGV/PGA) y (PGD/PGV) para algunos terremotos de falla cercana (Fuente: Malhotra P. K.,1999. Modificado)*

Terremoto	PGV/PGA	PGD/PGV
El Centro (1940)	0.12 seg.	0.58 seg.
Imperial Valley (1979)	0.25 seg.	0.50 seg.
Sylmar (1994)	0.16 seg.	0.23 seg.

*Tabla 4.10: Comparación de los anchos de las zonas sensibles a las aceleraciones de algunos terremotos de fuente cercana con los fijados por el reglamento norteamericano UBC (1994 y 1997). (Fuente: Malhotra P. K., 1999. Modificado)*

<b>Terremoto – Ordenada Espectral</b>	<b>Ancho de la zona sensible a las aceleraciones</b>
El Centro (1940)	0.50 seg.
Imperial Valley (1979)	1.80 seg.
Sylmer (1994)	0.60 seg.
UBC (1994) para roca	0.40 seg.
UBC (1994) para suelos blandos	0.90 seg.
UBC (1997) para zona 4, suelo tipo “B” y fuente ubicada a más de 15 Km de distancia.	0.40 seg.
UBC (1997) para zona 4, suelo tipo “E” y fuente ubicada a menos de 2 Km de distancia.	1.40 seg.

Por lo tanto los resultados obtenidos por Malhotra (1999) indican que para terremotos de falla cercana se hace necesario aumentar el ancho de la zona sensible a las aceleraciones del espectro, lo que indica que existirán estructuras de periodos, que tradicionalmente admitíamos como valores altos, en la zona sensible a las aceleraciones, zona que sólo afectaba a las estructuras de periodos bajos. Por lo tanto se manifiesta una reducida flexibilidad aparente, es decir que una estructura se comportará como rígida o flexible dependiendo si se encuentra dentro de la zona del espectro sensible a las aceleraciones o fuera de ella.

El efecto de “dirección”, característico de los movimientos de falla cercana, provoca que la componente normal sea sistemáticamente mayor que la paralela para periodos mayores que 0.5 seg., por lo tanto sería necesario especificar espectros de respuestas por separados para ambas direcciones. La presencia del pulso característico se encuentra en una estrecha banda cuyos periodos crecen con la magnitud. La dependencia con la magnitud lleva a que el espectro de respuesta tenga un pico cuyo periodo crece con ella. Por lo tanto la demanda de terremotos de mediana magnitud puede ser más crítica que la de otros, de alta magnitud para periodos intermedios (Somerville, P., 2002).

Los trabajos de Somerville (2002) comparan ordenadas espectrales de terremotos moderados ( $M = 6.7-7.0$ ) con fuertes terremotos ( $M = 7.2$  á  $7.6$ ) y se observa que para periodos comprendidos entre 0.5 a 2.5 seg., los de gran magnitud, son comparables a las que define el

UBC-97, mientras que los de magnitud moderada exceden las ordenadas espectrales definidas por dicho reglamento. Los grandes terremotos son críticos para periodos de aproximadamente 4 seg.

Este último efecto resulta ser contrario a los actuales modelos de escalonado de espectros que se incrementan monótonicamente con la magnitud, para todos los periodos. Dicha característica del escalonamiento del espectro con la magnitud es la consecuencia natural de la estrecha banda de frecuencia del pulso (Somerville, 2002). Por lo tanto el movimiento de falla cercana no puede ser adecuadamente descrito por una determinada representación espectral de respuesta. La forma de la parte correspondiente a periodos intermedios a largos cambia con el incremento del nivel del espectro y con el aumento de la magnitud.

Este último efecto fue recogido por el UBC a través de los coeficientes “ $N_a$ ” y “ $N_v$ ” (UBC, 1997, Somerville, 2002), para las regiones espectrales sensibles a las aceleraciones y velocidades respectivamente. El UBC no distingue entre componente normal y paralela a la falla. Sin embargo puede ser prudente tener en cuenta dicho aspecto para obras ubicadas cerca de fallas activas, debido a la gran diferencia entre ambas. Recientes terremotos destructivos han mostrado polarización de los daños en la dirección normal a la falla, por ejemplo Northridge (1994) en dirección N-S y Kobe (1995) en la dirección NO-SE. Dicho efecto puede ser más importante para obras con configuraciones netamente diferenciadas en ambas direcciones (puentes, presas, etc). En estructuras nuevas podría orientarse la construcción de manera de alinear la mejor dirección sismorresistente con la normal a la falla.

Por lo tanto, ante la posibilidad de terremotos con fallas próximas y con el objeto de cuantificar los movimiento asociados a falla cercana, es conveniente efectuar análisis de respuestas con una representación en el dominio del tiempo, mediante pulsos equivalentes de velocidad o acelerogramas reales en reemplazo de los espectros de respuesta.

Existen trabajos de investigación (Sasani et al, 2000, Alavi et al, 2001, Cuesta et al, 2004) sobre el estudio de las semejanzas entre la respuesta de estructuras sometidas a movimiento de falla cercana y pulsos simples. Los registros próximos a la falla pueden ser representados por pulsos simples equivalentes, sin embargo todas las investigaciones concluyen que no es de esperar una perfecta coincidencia entre ambos registros debido a que los reales contienen componentes de altas frecuencias producto de los pulsos de importante energía generado por

la propagación de la ruptura de la falla. Sin embargo los pulsos simples son sencillos para ser utilizados desde el punto de vista del diseño y de la práctica habitual de la profesión, para esos casos, suministra la información suficiente para dar una solución aceptable a un problema práctico de uso frecuente.

Los efectos de “dirección” de la ruptura, en movimientos de falla cercana, causan una variación espacial en la amplitud y duración del movimiento del suelo y conlleva a diferencias entre la componente normal y paralela a la falla. Cada componente presenta una variación espacial alrededor de la falla y la misma se vuelve significativa a partir de un periodo de aproximadamente 0.60 seg., dicha diferencia aumenta a partir del citado valor de periodo. Los parámetros afectados son: la aceleración espectral media, la duración de la historia de tiempo de las aceleraciones y la relación de las aceleraciones espectrales de la componente normal y paralela a la falla (Somerville et al, 1997).

La aceleración espectral es mayor para periodos superiores a 0.6 seg. y la duración es menor cuando la ruptura se propaga hacia el sitio. Para sitios cercanos a la falla la aceleración espectral de la componente normal es mayor que la paralela, para periodos mayores a 0.60 seg. Dicha diferencia también depende de la magnitud, distancia y ángulo que forma la línea de ruptura con la dirección de propagación de las ondas viajando desde el foco al sitio (ver además punto 4.2.6). (Somerville et al, 1997).

#### **4.3.5. Respuesta estructural asociadas a los terremotos de falla cercana**

Los movimientos de falla cercana pueden conducir a importantes desplazamientos horizontales. Las demandas de desplazamientos inelásticos pueden ser mucho mayores que aquellas estimadas con las técnicas convencionales de predicción de desplazamientos para fallas alejadas del sitio.

Investigaciones relacionados con la determinación de factores ( $C_{\mu} = \frac{\Delta_{inelástico}}{\Delta_{elástico}}$ ) para estimar

las demandas de desplazamientos inelásticos para el diseño de estructuras emplazadas con proximidad a la fallas (Baez et al, 2000), demostraron que en general para periodos menores de 1.30 seg. el factor “ $C_{\mu}$ ” para registros de falla cercana, es mayor que para terremotos con origen en fallas más alejadas. Para periodos mayores a 1.80 seg., la relación es inversa y ambas diferencias aumentan con la razón de ductilidad. Las máximas relaciones del factor se dan para periodos comprendidos entre 0.10 y 0.80 seg. y para velocidades mayores a 55



cm/seg. Para periodos cercanos a 0.20 seg. y velocidades mayores a 80 cm./seg. el “ $C_\mu$ ” puede alcanzar valores de 1.30. Otros resultados indican que las demandas, en término de desplazamientos inelásticos, indican que estructuras de periodo corto, próximas a fallas activas, pueden experimentar mayores demandas de desplazamientos inelásticos que aquellas ubicadas a distancias alejadas. Dichos estudios se basaron en la evaluación de 82 registros con distancia a la fuente menores a los 15 Km para fallas trascurrentes, normales e inversas,  $M \geq 5.6$ , sitios con velocidad de ondas de corte mayores a 180 m/seg., PGA mayores a 2000 cm/seg.<sup>2</sup> y PGV mayores a 20 cm/seg.

El mismo trabajo de investigación (Baez et al, 2000) indica que la respuesta inelástica es muy sensible a la presencia de pulsos largos de aceleraciones, los cuales provocan grandes incursiones en rangos inelásticos. Los efectos de “dirección” hacia delante en terremotos de falla cercana tienen una influencia importante sobre la máxima respuesta elástica de estructuras de periodo largo (mayores a los 0.8 seg.). Por otro lado la relación entre la respuesta elástica e inelástica para una amplia gama de periodos (0.1 a 1.3 seg.) es fuertemente influenciada para los terremotos de falla cercana en comparación con registros de terremotos alejados. Por esta razón la investigación concluye que la modificación de las ordenadas espectrales elásticas del UBC-97 no son suficientes para controlar los desplazamientos inelásticos.

Otros estudios realizados sobre un total de 50 registros (Bray et. al, 2004), llegaron a la conclusión de que los movimientos tipo pulso resultan críticos en el diseño de estructuras emplazadas en proximidad a la falla. El análisis de sistemas elásticos e inelásticos de múltiples grados de libertad indican que la amplitud y periodo del pulso en la historia de velocidades del suelo resulta ser el parámetro que controla la respuesta. La radiación patrón de la dislocación de corte sobre la falla provoca un largo pulso de movimiento que tiende a estar orientado en una dirección perpendicular al plano de falla. Los efectos son típicamente de periodo largo y dicho efecto se observa claramente en la historia de velocidades, por lo tanto el uso del PGV es adecuado como representación de las amplitudes del pulso de velocidad en el dominio del tiempo.

Los movimientos de falla cercana presentan efectos locales difíciles de controlar y no contemplados por la filosofía actual del diseño sismorresistente. El registro del terremoto de Turquía 1999 (Yarimca), estación Kocaeli (terremoto que será considerado en la evaluación

de la respuesta del edificio con aislamiento de base) el desplazamiento permanente fue de aproximadamente 2 m. paralelo a la falla (dirección este – oeste) y el pulso de velocidad se encuentra orientado en la línea norte – sur, perpendicular a la dirección. Ambos ocurren al mismo tiempo, por lo que deberían considerarse como acciones simultáneas para evaluar la respuesta estructural, sin embargo, los efectos pueden calcularse separadamente porque ellos no están fuertemente correlacionados (Somerville, 2002).

Como se ha citado en diferentes partes del presente capítulo, una de las características principales de los registros de movimientos asociados a fallas cercanas es la presencia de pulsos largos de velocidad, aceleración y desplazamiento. Trabajos realizados por Anderson et al. en 1987 verificaron que los pulsos largos de aceleración son especialmente dañinos si el periodo del pulso es grande comparado con el periodo natural de la estructura.

Trabajos realizados por Iwan W. D. en 1997 utilizaron la hipótesis de que los pulsos en los terremotos de fuente cercana viajan a través de la altura de las construcciones en forma de ondas y que las prácticas del análisis convencional de superposición modal no son capaces de capturar los efectos de dichos pulsos. Para ello dicho autor propone espectros de demandas de distorsiones inelásticas para controlar dicho efecto, en reemplazo de los clásicos espectros de respuesta (Malhotra, 1999).

De los resultados del trabajo obtenido por Malhotra en 1999, hecho referencia en el punto 4.3.4, tabla 4.9 y tabla 4.10, es de esperarse que los terremotos de falla cercana impliquen mayores cortes en la base, distorsiones de pisos e incrementos en las demandas de ductilidad. Esto se debe a que una zona sensible a las aceleraciones más extensa permite que más modos de vibrar entren en dicha zona, por lo tanto, aumenta el correspondiente corte en la base. Relaciones altas de (PGV/PGA) muestran una pequeña contribución de los modos superiores mientras que, por el contrario, registros sísmicos con relaciones bajas de (PGV/PGA) muestran una mayor incidencia. La contribución de los modos superiores para registros con pulsos largos no siempre es mayor que aquellos registros sísmicos que no presenten el efecto de directividad. Se reduce la efectividad del amortiguamiento suplementario o adicional porque el mismo es más efectivo en sistemas flexibles que en sistemas rígidos y por último se exige un incremento de la demanda de ductilidad debido a que el factor de reducción de fuerzas es mayor para sistemas que caen dentro de la zona sensible a las aceleraciones (Malhotra P. K, 1999).

#### 4.4. Terremotos seleccionados para evaluar la respuesta estructural

El oeste de la República Argentina cuenta con importantes conglomerados urbanos (Mendoza, San Juan, La Rioja, Salta, Jujuy, etc.) emplazadas en zonas de alto riesgo sísmico. Entre ellos el Gran Mendoza constituye uno de los centros urbanos más densamente poblados de la región y representa el núcleo socio-económico de mayor importancia del oeste argentino. Dicha región y en particular Mendoza cuenta con pocos registros disponibles que representen adecuadamente las características descritas en el presente capítulo. Por lo tanto la escasez de datos puede ser salvada, dentro de ciertos límites, por registros de la parte oeste de los Estados Unidos (Saragoni, 2004).

Los sismos intraplaca superficiales o corticales ocurridos en la placa sudamericana han producido pocos registros con niveles importantes de aceleraciones. Esto ocurre igualmente en la región del oeste argentino, no obstante ello, dichos terremotos son los que han causado el mayor número de víctimas en Sudamérica (Frau et al, 2005).

A la fecha, para la zona de emplazamiento del edificio con aislamiento de base se dispone de sólo dos terremotos con registros de aceleración en el tiempo: el de Cauçete, San Juan de 1977 ( $M = 7.4$ ) con un registro en el emplazamiento del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) y el de Mendoza de 1985 ( $M = 5.9$ ) con cuatro registros. La Tabla 4.11 resume los parámetros instrumentales de los registros más importantes (Frau et al, 2005).

*Tabla 4.11: Parámetros de los principales registros del centro-oeste argentino (Ruiz y Saragoni, 2004) (Fuente: Frau et al, 2005).*

Fecha	Provincia	Estación	Dist. Hip [km]	Comp [Direcc]	Acel [g]	to [seg]	vo [cruces/seg]	PD $\text{g.s}^3 \cdot 10^{-4}$
<b>23-11-1977</b>	<b>San Juan</b>	INPRES	69,19	NS	0,19	69,7	8,59	15,12
				EW	0,20	71,2	7,87	22,39
				VERT	0,16	69,7	12,13	7,05
<b>26-1-1985</b>	<b>Mendoza</b>	Las Heras	31	NS	0,19	34,9	7,54	3,75
				EW	0,41	34,9	8,89	10,20
				VERT	0,13	34,9	12,42	0,86

La propuesta de “*Guías para el diseño de Planta Nucleares con aislamiento sísmico*” (Forni M., et al, 1994) indican que la selección de los acelerogramas deberían tener en cuenta, no

solamente las características de los mismos, sino la similitud de las condiciones locales del sitio de emplazamiento con aquellas donde se han obtenido los registros sísmico y en particular para terremotos asociados a falla cercana comparar las siguientes similitudes:

- Mecanismo de falla.
- Orientación de la falla y extensión de la zona de ruptura.
- Azimut del sitio medido desde la dirección principal de la propagación de la ruptura de falla.
- Condiciones locales del sitio.
- Patrones macrosísmicos.

Los puntos precedentes corresponden a condiciones geológicas locales y regionales los cuales fueron tratados en el capítulo tres de la tesis. Si bien existen pocos registros en la región (Tabla 4.11) los mismos evidencian características de sismos asociados a falla cercana y dicha justificación ha sido tratada en extenso en el presente capítulo. Por lo tanto en la selección de los acelerogramas primará el hecho de la proximidad a la falla, mecanismo de fallas, condiciones locales del sitio y patrones macrosísmicos tratados en el capítulo tres.

Dicha guía especifica además que es conveniente especificar como datos de los terremotos, no solamente los valores de aceleraciones máximas, sino también los relacionados con la velocidad y el desplazamiento. Además en los terremotos de falla cercana es importante tener presente la duración del terremoto, el cual debería ser corto dado el carácter “impulsivo” del mismo (con importantes cambios en los pulsos de velocidades). El valor máximo de la aceleración en las tres direcciones no necesariamente ocurren en el mismo instante de tiempo. (Forni, M., et al, 1994)

Por lo tanto en función de los antecedentes existentes en la región del emplazamiento del edificio y de las características de los terremotos de falla cercana se han seleccionados 17 terremotos para evaluar la respuesta en el dominio del tiempo de la estructura con aislamiento sísmico. En la tabla 4.12 se indican las características más importantes de los mismos y los valores picos de aceleración, velocidad y desplazamiento referidos a la componente de máxima.

Tabla N° 4.12: Listado de los terremotos seleccionado para evaluar la respuesta del edificio con aislamiento de base y sus principales características.

Terremoto	Fecha	Estación	Mag.	Distancia Epicentral (km)	Tipo Suelo	P <sub>D</sub> (cm-s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
<b>Tabas Irán</b>	16/09/78	Tabas 9101	7.4	3.00	C	13.20	0.85	121.4	94.60
<b>Imperial Valley</b>	15/10/79	Bond Corner	6.9	2.50	C	24.90	0.78	45.90	14.90
<b>Coalinga</b>	22/07/83	Transmitter Hill	5.7	9.20	A	4.70	1.08	39.70	5.40
<b>Loma Prieta</b>	17/10/89	Corralitos Eureka	7.1	5.10	B	8.40	0.64	55.20	10.90
<b>Loma Prieta</b>	17/10/89	Los Gatos	7.10	3.50	B	- - -	0.59	91.60	34.80
<b>Cape Mendocino</b>	25/04/92	Cape Mendocino	7.0	8.50	A	4.90	1.50	127.40	41
<b>Cape Mendocino</b>	25/04/92	Petrolia	7.0	- - -	A	8.70	0.662	89.45	25.83
<b>Northridge</b>	17/01/94	Tarzana Cedar Hill Nursery	6.7	17.5	B	32.40	1.78	113.60	33.20
<b>Northridge</b>	17/01/94	Rinaldi Receiving Sta	6.7	7.10	C	11.10	0.84	170.30	47.33
<b>Northridge New Hall</b>	17/01/94	La Country Fire Station	6.7	18	B	12.30	0.589	94.72	39.84
<b>Northridge</b>	17/01/94	Sylmar	6.7	18	B	8.50	0.842	124.70	28.91
<b>Kobe</b>	17/01/95	Kobe Observatory JMA	6.9	0.60	B	20	0.82	81.30	17.70
<b>Chi-Chi Taiwan</b>	29/09/99	TCU084	6.9	10.40	B	11.60	1.16	114.7	31.40
<b>Duzce Turquía</b>	12/11/99	Lamont375	7.3	8.20	B	7.90	0.97	36.50	7.20
<b>Imperial Valley</b>	15/10/79	El Centro Array N° 6	- - -	- - -	B	14.70	0.456	108.71	55.16
<b>Caucete San Juan</b>	23/11/77	INPRES	7.4	69.19	C	22.39	0.20	20.30	- - -
<b>Las Heras Mendoza</b>	26/01/85	Las Heras	5.9	31	C	10.20	0.41	28.12	3.87

Las designaciones utilizadas en la tabla precedente corresponden a:

P<sub>D</sub>: Potencial destructivo (Araya y Saragoni, 1984).

PGA: Aceleración máxima del terremoto.

PGV: Velocidad máxima del terremoto.

PGD: Desplazamiento máximo del terremoto.

Dado que la mayoría de los registros corresponden a la parte oeste de los Estados Unidos de Norteamérica, el tipo de suelo se ha clasificado de acuerdo al criterio utilizado por el Servicio

Geológico de los Estados Unidos (USGS) el cual lo realiza en función de la velocidad de la onda de corte “ $V_c$ ”. Los límites se indican en la Tabla N° 4.13.

*Tabla N° 4.13: Clasificación del tipo de suelo según USGS*

Tipo de suelo	Clasificación según USGS	Velocidad onda de corte
Roca	A	$> 750$ m/s
Firme	B	360 a 750 m/s
Blando	C y D	$< 360$ m/s

Un número importantes de los terremotos indicados en la tabla 4.12 corresponden a la base de datos de acelerogramas destructivos a nivel mundial denominada “**WDA**” (World Destructive Accelerograms), (Saragoni, et al., 2002). Dicha base de datos contiene registros de regiones donde se han observado efectivamente daño estructural. Los terremotos seleccionados son en consecuencia los únicos que serían útiles para estudios de comportamientos no lineales de estructuras tradicionales. Ello introduce un cambio importante en la disciplina fundamentalmente porque, hasta el momento, las respuestas no lineales son evaluadas con acelerogramas que en muchos casos no conducen a colapsos, por lo tanto las conclusiones que se obtienen no serían acertadas (Saragoni, R., 2000). La base de datos actualizada al 2001 presenta sólo 20 registros que han sido catalogados como colapsantes, es decir que conducen a colapsos estructurales y los mismos están agrupados en una sub-base de datos denominada WCA (World Collapse Accelerograms) (Frau et al, 2003).

Los importantes valores de aceleración registrados durante el terremoto de Northridge, California, 1994, demostraron que no es necesaria la ocurrencia de un terremoto de gran magnitud para alcanzar elevados niveles de aceleraciones. El terremoto de magnitud media ( $M_w = 6.7$ ) produjo valores de aceleraciones horizontales del terreno variables entre 0.35 g y 1.58 g., para estaciones situadas a 25 Km. de distancia del epicentro. De la misma manera, la aceleración vertical mayor a 1 g. fue registrada en la localidad de Tarzana, mientras que un sector cercano a la Presa Pacoima, el cual experimentó un efecto topográfico, superó el valor de 2 g (Mingorance, 2003b).

Los resultados preliminares obtenidos del análisis del sismo de Mendoza de 1861, junto con el valor de aceleración máxima (0.41g) alcanzado para el terremoto de 1985 ( $M_s$ : 5.9) aproximadamente a 28 Km. del sitio de liberación de energía, sugieren que las condiciones

geológicas bajo el Gran Mendoza tienden a favorecer la amplificación de las aceleraciones, aún para sismos de magnitudes moderadas (Mingorance, 2003b).

Los terremotos elegidos, ocurridos en distintas partes del mundo, tratan de representar, en su conjunto, las características de los movimientos que pueden esperarse en el Gran Mendoza. La selección de los mismos se ha realizado teniendo en cuenta los parámetros de magnitud, distancia epicentral, tipo de suelo, aceleración, velocidad y desplazamientos.

En el listado de terremotos indicados en la tabla 4.12, se ha incorporado el terremoto de Coalinga, estación Transmitter Hill el cual posee características similares al sismo de enero de 1985 ocurrido en Mendoza. Dicho sismo afectó el estado de California (EEUU), el 02 de mayo de 1983 y ocurrió en ambientes tectónicos compresivos similares a las características del fallamiento local y regional hecho referencia en el capítulo tres.

El terremoto fue de magnitud  $M_s = 6.5$ , ocurrió al este de la falla de San Andrés, en la zona central de California (coordenadas aproximadas  $36.15\text{ N} - 120.15$ ), a lo largo de una franja de grandes pliegues cuaternarios y, generalmente, fallas inversas en el subsuelo. Después de producido el terremoto se efectuaron estudios geodésicos detallados y monitoreo de réplicas. Los resultados mostraron que en el momento del sismo el estrato plegado de 10 km suprayacente al hipocentro se levantó varias decenas de centímetros, quedando establecida claramente la relación entre plegamiento superficial y fallamiento enterrado. Sin embargo las distribuciones de réplicas no revelaron un plano de falla, lo que muestra más bien un gran volumen que se reacomodó después de ocurrido el sismo principal. Dicho reacomodamiento fue limitado en profundidad por una aparente superficie buzante (Microzonificación sísmica del Gran Mendoza, 1989).

#### **4.5. Resumen**

En el presente capítulo se han resumido los resultados de numerosos trabajos de investigación que ponen de manifiesto las características relevantes de los terremotos de falla cercana y sobre todo las diferencias que existen entre aquellos registros sísmicos provenientes de fuente cercana y los de fallas más alejadas. Muchos de los trabajos citados en el presente capítulo han encontrado diferencias entre las respuestas estructurales evaluadas con uno u otro tipo de registro.

En los últimos treinta años se ha visto un crecimiento importante de la población en regiones sísmicamente activas, el Gran Mendoza no permanece ajeno a dicha realidad y hoy existen evidencias, al menos geológicas, que algunas fallas activas (Cerro la Cal) incursionan dentro de la ciudad y por lo tanto muchas de las construcciones existentes estarán expuestas a terremotos de falla cercana. El edificio con aislamiento sísmico, motivo de la presente tesis, se encuentra emplazado en proximidad a la falla Cerro la Cal – Calle Perú, ésta situación destaca la importancia de considerar los efectos de falla cercana resumidos en los puntos precedentes.

El capítulo hace un resumen de la actividad sísmica superficial y sus fuentes potenciales, que si bien fueron extensamente desarrolladas en el capítulo tres, el tratamiento reiterado del tema tiene como objeto enfatizar la existencia de fallas activas próxima o dentro de los centros urbanos poblados.

Se ha consultado un número importante de trabajos de investigación que tratan el problema de falla cercana y se han sintetizado las características más relevantes de los terremotos asociados a dicho tipo de falla (dirección de ruptura, orientación del pulso, influencia sobre los espectros de respuesta, respuesta estructural, características del movimiento del suelo y la forma más adecuada de caracterizar los mismos). Dichos antecedentes han permitido realizar una selección de 17 terremotos que tratan de representar, en su conjunto, las características de los movimientos que pueden esperarse en la zona de emplazamiento del edificio con aislamiento de base. En la selección se han tenido en cuenta distintos parámetros entre lo que se destacan: la magnitud, distancia epicentral, tipo de suelo, aceleración, velocidad y desplazamiento.

En el Anexo (B) se ha representado para cada uno de los terremotos de la tabla 4.12. los siguientes parámetros:

1. *Las historias de las aceleraciones de las tres componentes (Fig. B-401 á B-417).*
2. *Las historias de los desplazamientos de las tres componentes (Fig. B-469 á B-479).*
3. *Las historias de las velocidades de las tres componentes (Fig. B-435 á B-451).*
4. *Los espectros y pseudoespectros de aceleración junto a los espectros de desplazamientos (Fig. B418 á B-434).*
5. *Los espectros y pseudoespectros de velocidades (Fig. B-452 á B-468).*



Si bien no es objeto de la presente tesis el estudio de terremotos de falla cercana, es posible de la observación de las citada figuras concluir sobre aspectos muy preliminares que caracterizan a los terremotos de falla cercana.

En las historias de desplazamientos y velocidades de muchos de los terremotos, se observa la presencia de pulsos de larga duración característicos de los movimientos de falla cercana, tratados en el presente capítulo. Debido a las características particulares de éste tipo de terremoto, existen diferencias entre el espectro real de velocidades y el pseudoespectro correspondiente. Dichas diferencias son más notorias en la medida que aumenta el amortiguamiento y en zona de periodos altos.

Los sistemas de aislación de base proporcionan las mayores ventajas en zonas de periodos altos. En muchos casos la respuesta del edificio aislado depende del pulso de velocidad, por lo tanto, al momento de diseñar el sistema de aislamiento, es necesario tener en cuenta las diferencias entre el espectro real y pseudoespectro de velocidades.

Se observa que para los terremotos de falla cercana, no existen diferencias entre el espectro real y pseudoespectro de aceleraciones elásticas. Se manifiestan algunas diferencias cuando se aumenta el porcentaje de amortiguamiento respecto del crítico. La forma de los espectros de desplazamientos pueden ser muy variados y dependen de las características del terremoto. Existen casos muy concretos (Coalinga) en el cual los desplazamientos elásticos máximos se desarrollan en un lapso de tiempo menor a un segundo. Estas observaciones demuestran la importancia de realizar análisis en el espacio temporal para evaluar las respuestas de los sistemas de aislamiento, debido a que el contenido de frecuencias de la señal sísmica puede originar picos no detectados por otros métodos más simples. Esta última conclusión adquiere aún mayor relevancia cuando las señales sísmicas se encuentran asociadas a terremotos de falla cercana.