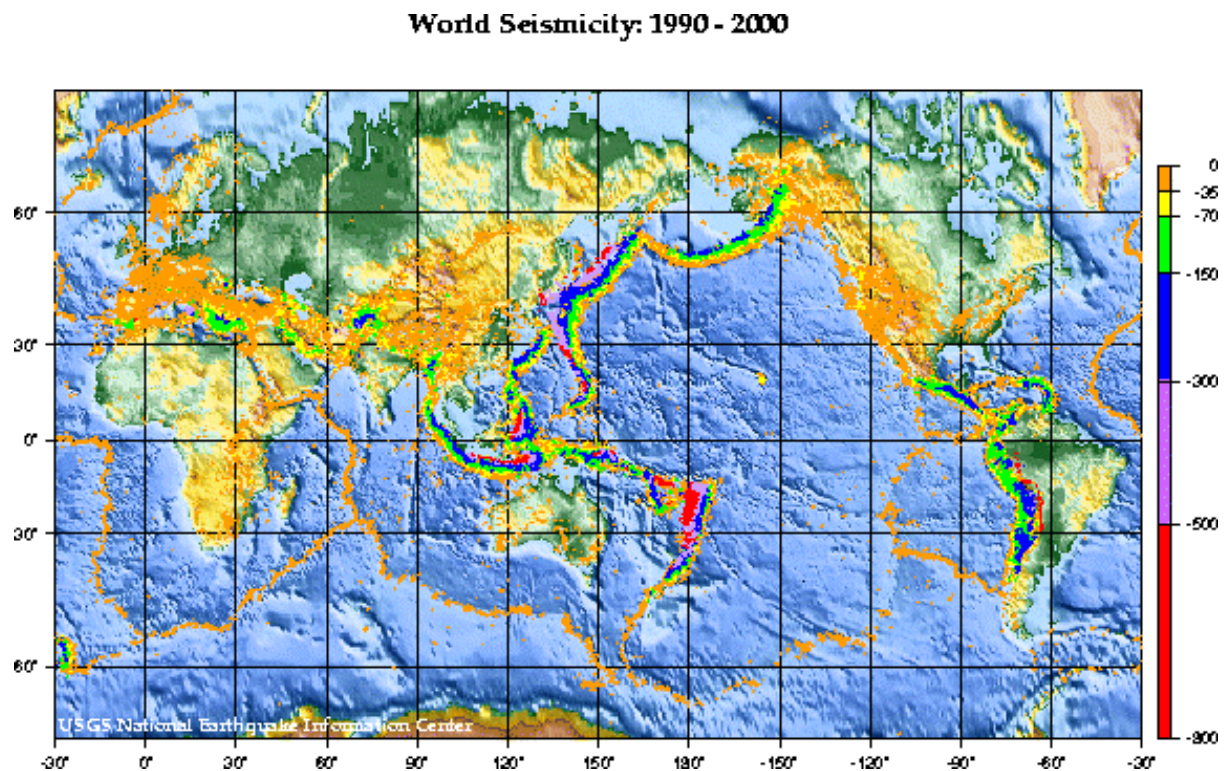


## Capítulo 2

### Efectos de los grandes terremotos sobre las obras de ingeniería. Oportunidades para discutir una nueva concepción del diseño sismorresistente

#### 2.1 Introducción

Los terremotos han tenido y tendrán un impacto significativo sobre nuestra sociedad. Estos fenómenos naturales han dado como resultado pérdidas extraordinarias de vida, cuantiosos daños y destrucción a la propiedad (tanto privadas como del estado) en todos los países donde ellos han ocurrido. Una gran parte del continente está seriamente expuesto al peligro sísmico debido a la ocurrencia de terremotos (Fig. 2.1).



*Fig. 2.1 Localización de los epicentros de terremotos ocurridos a nivel mundial entre 1990-2000  
(Fuente <http://neic.usgs.gov/neis/general/seismicity/world.html>).*

Cuatro ejemplos contemporáneos nos demuestran la magnitud del impacto de estos fenómenos de gran destrucción. El terremoto de Loma Prieta ocurrido el 17 de octubre de 1989 en Estados Unidos de Norteamérica, con una magnitud de 6.9 en la escala Richter, afectó al estado de California desde la costa de Monterrey hasta San Francisco. A pesar de su importancia el terremoto sólo arrojó como resultado 63 muertes, pero causó entre 6 á 10 mil millones de dólares en pérdidas y daños a la propiedad privada y del estado. ( disponible en [http:// www.uprm.edu/socialsciences/cisa](http://www.uprm.edu/socialsciences/cisa)).

El terremoto en Hyogo-Ken Nanbu, Kobe, Japón ocurrido el 17 de enero del 1995, magnitud 7.2 en la escala de Richter, dejó un saldo 5.100 muertos en Kobe, 13 personas desaparecidas y aproximadamente 27.000 heridos. El 20% de la población de Kobe quedó sin hogar y más de 10.000 edificios fueron destruidos. ( disponible [http:// www.uprm.edu/socialsciences/cisa](http://www.uprm.edu/socialsciences/cisa)).

El 25 de enero del 1999, la parte occidental de Colombia fue impactada por un terremoto con una magnitud de 6.0 en la escala de Richter. Datos oficiales informaron un total de 1.000 muertos y un número, no precisado, pero importante de heridos.

El 29 de marzo de 1999, a las 12:35 a.m., en el estado de Uttar Pradesh en India, ocurrió un terremoto con una magnitud de 6.8 en la escala Richter. Datos oficiales informaron que hubo más de 100 muertos, aproximadamente 300 heridos y más de 5.000 hogares totalmente destruidos (disponible en [www.uprm.edu/socialsciences/cisa](http://www.uprm.edu/socialsciences/cisa)).

Los terremotos representan para los lugares donde ellos ocurren verdaderos desastres. Los mismos se caracterizan por ser un evento identificable en el tiempo y en el espacio, en el cual una comunidad es afectada en su funcionamiento normal con pérdidas de vidas y daños importantes en sus propiedades y servicios, que impiden el cumplimiento de las actividades esenciales y normales. Los terremotos se caracterizan por la cantidad de pérdidas económicas, el número de muertos y heridos, la falta de preparación de la mayoría de los gobiernos y los traumas sociales, psicológicos y/o políticos que estos fenómenos físicos ocasionan. El hecho de que las personas pierdan sus viviendas en oportunidad de un terremoto, influyen fuertemente sobre los traumas sociales y psicológicos de las familias y toda la sociedad. Por lo tanto es importante desarrollar nuevas técnicas que permitan controlar el daño y el colapso mediante una nueva concepción del diseño sismorresistente.

El desastre que conlleva un terremoto implica el colapso casi completo de todos los procesos sociales, de la estructura misma de la sociedad (por ejemplo, aspectos tan triviales como son las actividades del vivir cotidiano) y de las interacciones primarias y secundarias. Incluye la destrucción extensa de la infraestructura funcional, tales como: edificios, sistemas de comunicación y de apoyo social. Además, afecta los sistemas de supervivencia biológica, el orden social, la motivación y el manejo de crisis. Un desastre tiene un alto costo en términos sociales, demográficos, económicos y políticos.

Si bien las investigaciones sobre la predicción de los terremotos en los últimos años ha tenido un importante desarrollo (Phillips T. et al, 2003), todavía no es posible informar a la población sobre la proximidad y el peligro de un terremoto. La ausencia casi total de planes de evacuación o de evacuación tardía de personas en riesgo, la falta de equipo, la falta de materiales y de personal adiestrado para proveerle los servicios indispensables a la población ante una situación de crisis, la falta de preparación y la falta de conocimiento y/o educación de la población sobre lo que es necesario hacer ante un terremoto, ponen de manifiesto situaciones propicias para el desarrollo de un desastre. Por lo tanto, un terremoto no sólo ocasiona daños y pérdidas económicas sino que además, representa un evento social de importante complejidad que amerita contar con un plan de control de la vulnerabilidad sísmica. Una posibilidad es restarle consecuencias a los efectos de los terremotos protegiendo las construcciones civiles, sobre todo aquellas necesarias para atender la emergencia post-terremoto.

Los países en vías de desarrollo se ven altamente impactados por la ocurrencia de un terremoto destructivo. En nuestros países los recursos son escasos y como tales es necesario optimizarlos. Diseñar importantes estructuras, aquellas que tienen la función de atender la emergencia, en zonas de alto riesgo sísmico con técnicas tradicionales no representa, para el país, una óptima inversión. Las mismas, por lo menos, presentarán daños estructurales, no estructurales y de contenidos, los cuales representan pérdidas económica muchas veces considerable. Las precarias condiciones económicas son por si mismas también condiciones de vulnerabilidad, ya que la magnitud del daño real es mayor si la población carece de los recursos a partir de los cuales pueda recuperarse (recursos económicos, naturales y sociales).

Por lo tanto, las reflexiones precedentes ponen de manifiesto la importancia y la necesidad de que la ingeniería sísmica del país y del mundo promuevan espacios para discutir nuevas

filosofías del diseño sismorresistente apoyadas en técnicas no tradicionales que permitan un efectivo control de la vulnerabilidad de las obras de ingeniería. Los sistemas de aislamiento sísmico de base y los disipadores de energía, hoy representan técnicas probadas y aceptadas para cumplir eficientemente tales objetivos.

## 2.2 Los grandes terremotos del mundo

*"Las montañas saltaron como corderos y las colinas como ovejas jóvenes." (Descripción de un terremoto en la Biblia, Salmo 114).*

*"Ojalá permita Dios que los Pilares de la tierra queden, una vez más, sujetos y se restaure el equilibrio entre las cosas naturales y morales." (Conde Francesco Ippolito, tras el terremoto ocurrido en Calabria, Italia, 1773)*

La ocurrencia de los terremotos se remontan a millones de años y su origen es casi coincidente con nuestro planeta, en todos los casos donde ellos se han producido han ocasionados importantes daños ya sea desde el punto de vista material como de pérdida de vida humanas. Se tienen antecedentes históricos de los mismos prácticamente a partir del siglo XI (Anexo A, Tabla A.I). Sin embargo cerca de veinte terremotos han tenido un fuerte impacto en la sociedad, en la ingeniería civil y en particular en la sismológica y sismorresistente. Estos grandes terremotos del mundo afectaron distintos puntos del planeta e impactaron fuertemente a los países, a sus habitantes y a los gobiernos nacionales. En Fig. 2.2 se indican sus epicentros.

La magnitud del terremoto no es el único parámetro que define el tamaño del daño, existen otros factores tales como densidad de población donde ellos ocurren, proximidad a la falla, profundidad al foco, tipo de construcción afectada, condiciones locales del suelo, desastres colaterales debidos al mismo (inundaciones, aludes e incendios), hora local de ocurrencia del terremoto, estado del tiempo, etc.

China es el país que posee el mayor promedio de movimientos sísmicos por año, 2.10, seguido por Indonesia con 1.62 e Irán con 1.43. La mayor cantidad de muertos por año se han producido en Irán con aproximadamente 2.250 personas, seguido por Armenia con cerca de 1.200 personas y Turquía con aproximadamente 950 personas (Ver Anexo A, Tabla A.II)

(disponible en [http:// www.undp.org/bcpr/disred/documents/publications/rdr/espanol/ae/t3.pdf](http://www.undp.org/bcpr/disred/documents/publications/rdr/espanol/ae/t3.pdf))

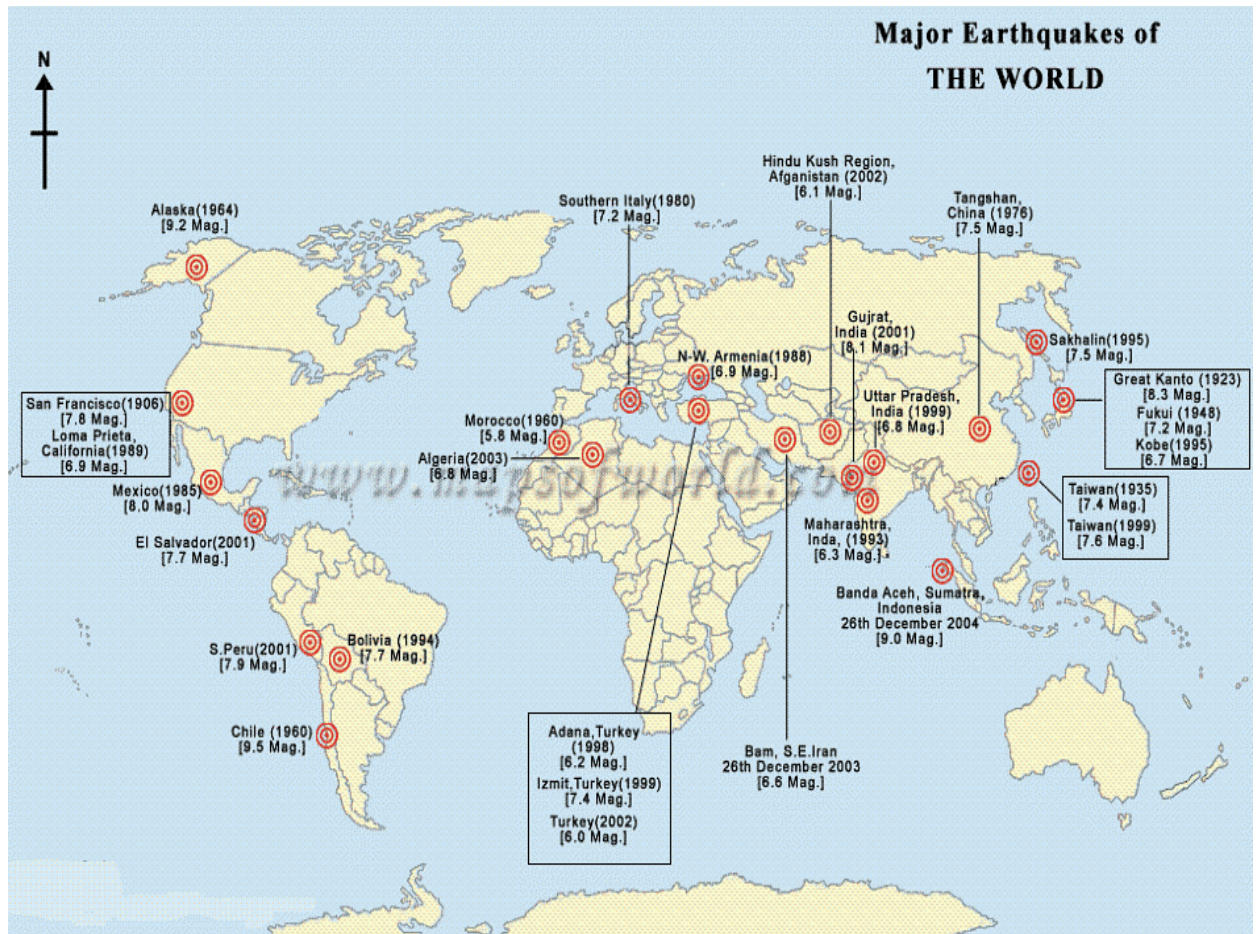


Fig. 2.2 Localización de los grandes terremotos ocurridos en el mundo a partir del año 1900 (Fuente <http://www.mapsofworld.com>).

El tratamiento y la incidencia en el daño de los factores enunciados anteriormente resultan sumamente importantes para comprender los efectos de los terremotos, sin embargo es oportuno aclarar que el tema escapa a los objetivos de la tesis. El presente capítulo tiene como objetivo principal resumir los antecedentes de los daños, económicos y sociales, de los grandes terremotos del mundo con el objeto de evidenciar la urgente necesidad de plantearnos una nueva filosofía del diseño de la estructuras y obras en general emplazadas en zonas de alto riesgo sísmico.

### 2.2.1 Efectos de los terremotos destructivos ocurridos en el mundo

Los terremotos forman parte, sin duda, de los desastres naturales más devastadores. Han causado durante la década de 1970 la muerte de 38.970 personas cada año, número superior al



que registran otros desastres naturales (el segundo lugar lo ocupan los ciclones con una pérdida de 34.360 vidas). Sin embargo es importante señalar que la media de dicha década fue extremadamente elevada, debido a las 242.000 personas que perecieron en el terremoto de Tangshan, China, en 1976,  $M = 7.5$ .

Dos terceras partes de los mayores terremotos del mundo se han producido en el llamado "*Cinturón de fuego*" que circunda el Pacífico (Fig. 2.1). Dicho anillo se extiende desde las costas de Sudamérica y Norteamérica hasta Alaska a lo largo de las islas Aleutianas, luego continúa a la altura de la plataforma continental del Japón, para pasar a las islas Filipinas, Indonesia y Nueva Zelanda. Los terremotos ocurridos en dicha zona han producido más de 100.000 muertos en Asia y principalmente en China. En 1556, un terremoto ocurrido en la provincia de Shensi costó la vida de 830.000 personas ( disponible en <http://www.ssn.unam.mx>)

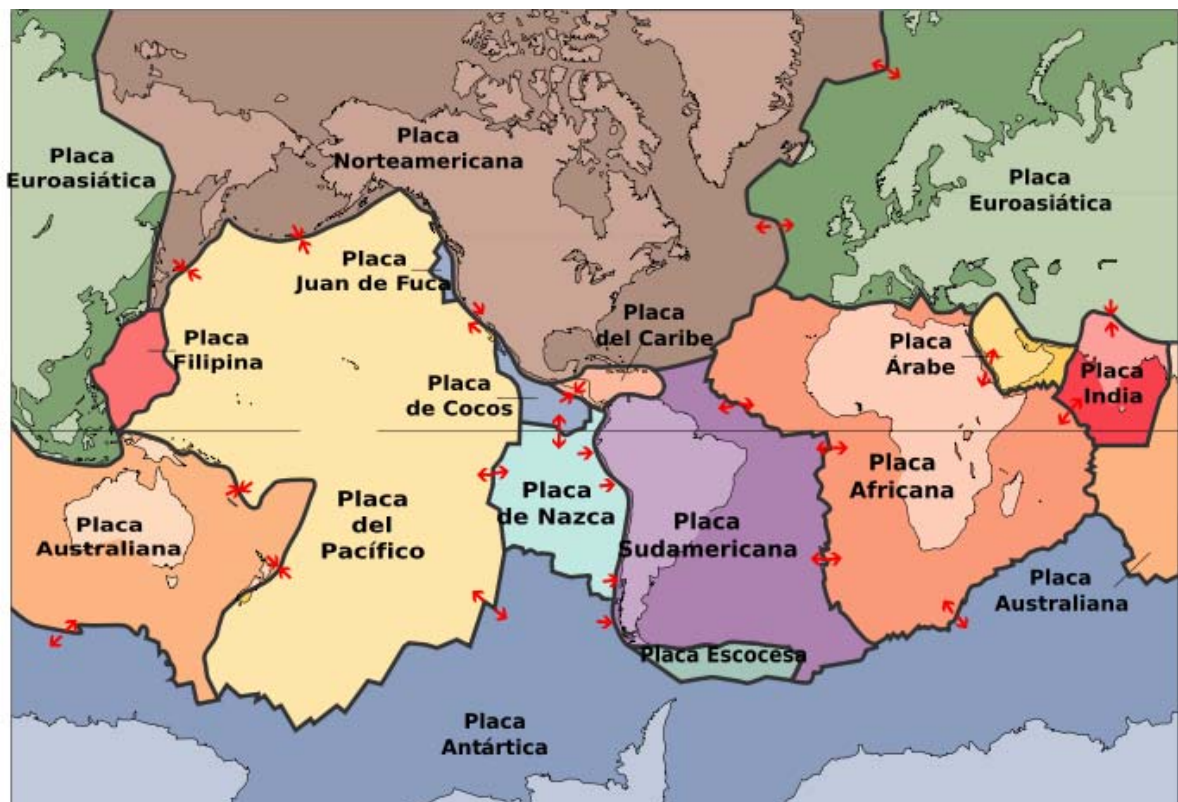


Fig. 2.3 Principales placas tectónicas (Fuente Wikipedia, [http://es.wikipedia.org/wiki/Tect%C3%B3nica\\_de\\_placas](http://es.wikipedia.org/wiki/Tect%C3%B3nica_de_placas)).

Una segunda zona de importancia se extiende a lo largo de los límites de las placas Australiana, Euroasiática India y Árabe, (Fig. 2.3) desde Indonesia, a lo largo del Himalaya y del eje del Mediterráneo. Alrededor del 75% de las muertes producidas por los terremotos a nivel global entre 1950-1970 ocurrieron en dicha zona, como resultado de poseer una mayor densidad demográfica que la del cinturón circumpacífico. En el Hemisferio Occidental, los terremotos más devastadores se producen en la costa occidental de América Central y Meridional; en ellos se han informado más de 10.000 muertes en Guatemala, Argentina, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. (disponible en <http://www.ssn.unam.mx>).

En el terremoto de Guatemala, 1976 ( magnitud Richter 7.5) murieron 22.000 personas, mientras que 75.000 sufrieron heridas y más de un millón, de los seis millones de habitantes del país, quedaron totalmente desamparados, 14 ciudades fueron prácticamente arrasadas y, en otras 17 ciudades, menos del 33% de los edificios permaneció en pie aunque muchos de ellos con daños. Las pérdidas económicas ascendieron a 1.400 millones de dólares comparable con los 1.300 millones de dólares del terremoto que afectó a la capital de Nicaragua en al año 1972.

El terremoto de San Fernando, California en 1971, alcanzó un valor de 6.6 en la escala Richter, se informaron muy pocas muertes, sólo 63 personas, sin embargo las pérdidas económicas se estimaron entre 6 á 10 mil millones de dólares. Es importante notar las cuantiosas pérdidas económicas que conlleva la ocurrencia de un terremoto destructivo para un país (Ver además Anexo A, Tabla A.III), dichas pérdidas económicas impactan más fuertemente en países en vías de desarrollo donde los recursos son más escasos. Por ejemplo el terremoto ocurrido en Managua, Nicaragua, en 1972, acusó una magnitud de 6.2 en la escala Richter, produjo la muerte de 5.000 personas y las pérdidas económicas fueron de 800 millones de dólares (disponible en <http://www.ssn.unam.mx>).

Uno de los terremotos que marca el inicio del siglo XX e instala en la sociedad una preocupación que perdura hasta nuestros días fue el terremoto de San Francisco. En 1906 en la costa oeste de los EE.UU., la ciudad y sus alrededores fueron sacudidos por un devastador terremoto de más de 8 grados en la escala Richter. Se produjeron importantes incendios que consumieron gran parte de la ciudad debido a la falta de agua para combatirlos y a la combustibilidad de los materiales. El desastre arrojó un balance de aproximadamente 2.500 muertos, la destrucción de 28.000 edificios y 225.000 personas quedaron sin hogar. Las pérdidas económicas fueron estimadas en más de 400 millones de dólares de la época (Fig. 2.4).



*Fig. 2.4 Efectos del terremoto de San Francisco, California, 1906 (Fuente USGS, <http://www.paralibros.com>).*

En 1908 en Italia se produce un grave terremoto en Messina, ocasiona 150.000 víctimas. En 1923, el 1º de septiembre, Japón sufre un devastador terremoto de magnitud 8.3 grados (Great Kanto) que afecta a las ciudades de Yokohama y Tokio. Ambas quedan en su mayor parte destruidas, debido a un sin número de incendios. Informes oficiales indican un saldo aproximado de 100.000 muertos y la caracterizan como la mayor tragedia, en su tipo, que debió enfrentar Japón durante ese siglo (disponible en <http://www.paralibros.com>).

El 22 de Mayo de 1960 el sur de Concepción de Chile es asolado durante dos días por una sucesión de terremotos de más de 7 grados de magnitud en la escala de Richter. Algunos de los movimientos sísmicos provocan además un maremoto sobre las regiones costeras de Valdivia (Fig. 2.5). El terremoto arrojó como consecuencia la muerte de 2.000 personas, sin embargo en toda la región las muertes ascendieron entre 4.000 á 5.000, 3.000 personas resultaron heridas y aproximadamente 2.000.000 perdieron sus hogares (disponible en <http://www.angelfire.com/nt>).



*Fig. 2.5 Efectos del terremoto de Chile de 1960 (Fuente: Juan Casanovas, <http://www.paralibros.com>).*

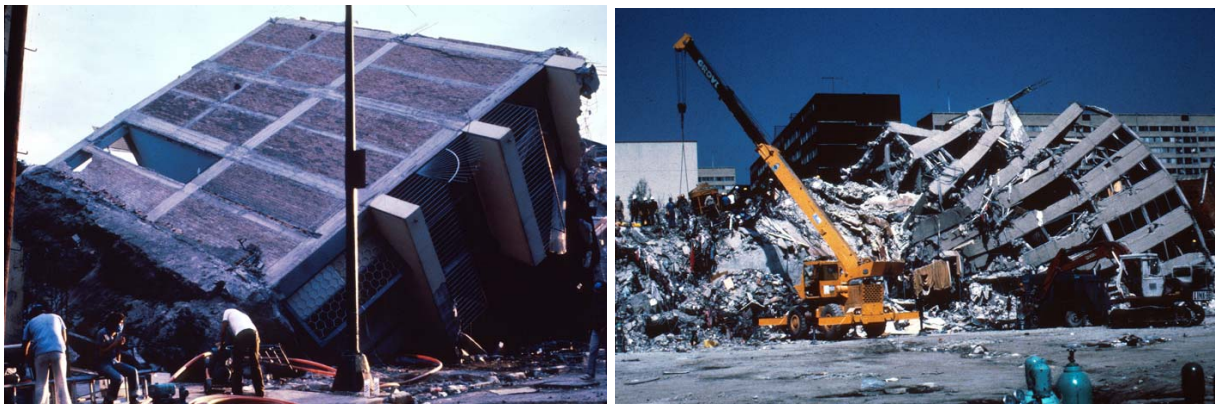


En 1964 Estados Unidos de Norteamérica es afectado por el mayor terremoto de su historia. El 28 de marzo, Anchorage y otras localidades vecinas en Alaska son afectadas por un terremoto cuya magnitud llega a 9 grados en la escala de Richter. Las pérdidas de vidas humanas fueron pocas, sólo 130 muertos, pero las pérdidas económicas ascendieron a 1.020 millones de dólares ( Fig. 2.6).



*Fig. 2.6 Efectos del terremoto de Alaska, 1964 (Fuente: <http://libraryphoto.er.usgs.gov/earth1.htm>)*

En 1985 el Distrito Federal de México y sus alrededores es sacudido por un violento terremoto de magnitud de 8.1 grados en la escala de Richter (Fig. 2.7). Informes oficiales indican aproximadamente 10.000 muertos, 40.000 heridos e importantes pérdidas económicas no informadas oficialmente (disponible en <http://www.paralibros.com>).



*Fig. 2.7 Efectos del terremoto de México, 1985 (Fuente: <http://libraryphoto.er.usgs.gov/earth1.htm>)*

Durante los últimos 25 años, sólo los terremotos han causado más de un millón de muertes en el mundo. Más de 80 % de las muertes por causa de dichos desastres naturales han ocurrido en el siglo XX y en 9 países, y casi la mitad en uno de ellos, China.

El 28 de julio de 1976, un terremoto de magnitud 7.8 ocurrió en Tangshan, al noreste de China (Fig. 2.8), el cual tuvo como resultado 240.000 muertos. (disponible en <http://www.crid.or.cr/crid/MiniKitEarthquakes>).



*Fig. 2.8. Efectos del terremoto de Tangshan, China, 1976 (Fuente: <http://libraryphoto.er.usgs.gov/earth1.htm>)*

La acelerada urbanización de las áreas sísmicamente activas del mundo, cuyas poblaciones alcanzan entre 20.000 a 60.000 habitantes por kilómetro cuadrado, resaltan la vulnerabilidad de tales áreas y marca la importancia de implementar, a nivel de gobiernos nacionales, normativas capaces de mejorar el comportamiento de las estructuras emplazadas en zonas de elevado riesgo sísmico. Dichas áreas requieren un fuerte contenido de técnicas no tradicionales para controlar la vulnerabilidad de las obras emplazadas en ellas.

El trauma causado por el colapso parcial o completo de las estructuras hechas por el hombre es la causa más común de muerte y lesión en la mayoría de los terremotos (Cobun et al, 1992). Cerca de 75% de las muertes atribuidas a terremotos en este siglo fueron causadas por el colapso de edificaciones que no fueron adecuadamente diseñadas o bien fueron construidas con materiales inadecuados (Coburn A, Pomonis A, et al, 1992).

Durante el año 1995 se manifestaron las mayores pérdidas económicas. El terremoto ocurrido en Kobe, Japón, provocó daños por unos 180 mil millones de dólares y dicho país anualmente invierte un promedio anual de 100 millones de dólares en pronósticos sismológicos (disponible en <http://elsalvador.com/hablemos/milenio>).

El 13 de Enero de 2001 en ocasión del terremoto de El Salvador se producen 1.140 muertes, 8.000 heridos, más de 40.000 viviendas destruidas, 1.100.000 personas damnificadas. Según el informe de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL), las pérdidas totales ascendieron a 1.660 millones de dólares, lo que equivale al 13% del Producto Interno Bruto y al 55% de las exportaciones de todo el país en el año 2000. El informe final del Comité de Emergencia Nacional (COEN) señaló que el 25.60 % de la población resultó damnificada. El Informe de *“Desarrollo Humano de El Salvador 2001”*, calculó que más de 250.000 salvadoreños ingresaron a la pobreza extrema a causa de la tragedia. (disponible en <http://www.rescate.com/salvador>).

El caso del Salvador demuestra en forma clara que los efectos de los terremotos no sólo se centran en pérdidas económicas o de vidas humanas sino que además traen como consecuencia aspectos sociales que requieren muchos años para ser revertidos. Estas situaciones se observan claramente y fundamentalmente en países donde los recursos son escasos, por lo tanto es sumamente importante la optimización de los pocos recursos que cuenta el estado nacional para realizar construcciones seguras con el objeto de minimizar: el daño, las pérdidas de vidas humanas y las consecuencias sociales de los terremotos. Las técnicas innovadoras, entre ellas los sistemas de aislamiento sísmico de base, ofrecen dicha posibilidad.

El 23 de Junio de 2001 se produce un importante terremoto en la costa sur de Perú con una magnitud de 7.9 en la escala Richter. Las ciudades más afectadas fueron Arequipa y Moquegua. Un primer balance de los daños indicaron una dramática realidad, 42.350 de los 88.758 personas que habitan la región fueron afectadas. Oficialmente, 11.886 viviendas fueron destruidas o quedaron inhabitables (disponible en <http://www.geocities.com/adeviperu>).

El 20 de Septiembre de 1999 se produce un importante terremoto en Taipei, Taiwán con una magnitud de 7.7 grados en la escala de Richter. El mismo produjo el colapso de una gran parte de la infraestructura urbana y económica de la isla de Taiwán y causó la muerte de aproximadamente 2.192 personas; más de 30.000 viviendas y 1.200 edificios colapsaron. Informes oficiales indicaron además la presencia de 8.737 heridos y de 62 personas desaparecidas, pero no precisaron las pérdidas económicas que el terremoto representó para el país (disponible en <http://www.geocities.com/Pipeline/Dropzone>).

En el último decenio, los terremotos fueron los desastres más dramáticos de toda Europa y costaron 27.000 millones de dólares tan solo en daños. La mayoría de las víctimas murieron

por derrumbes de edificios. El último gran terremoto de Bucarest, en 1977, dejó un saldo de 1.650 muertos y 10.000 heridos (disponible en <http://www.ifrc.org/sp/publicat/wdr2002>). Próximo a los países europeos, uno de los países más fuertemente afectado por los terremotos es Turquía.

El 17 de agosto de 1999 se produce un importante terremoto en Turquía con una magnitud de 7.4 grados en escala de Richter. El mismo produjo la muerte de 15.826 personas, más de 43.953 heridos sólo en la zona del noroeste de Turquía y aproximadamente entre 35.000 a 40.000 personas desaparecidas, 213.000 viviendas sufrieron severos daños y fueron destruidas. Los informes oficiales no precisaron las pérdidas económicas que el terremoto representó para el país (disponible en <http://www.geocities.com/Pipeline/Dropzone>).

Turquía ha tenido grandes terremotos en su historia que han ocasionado importantes pérdidas materiales y de vida. El terremoto ocurrido el 27 de Junio de 1998 en Adana – Ceyhan, tuvo una magnitud de 6.2 en la escala de Richter y produjo la muerte de 50 personas, sin embargo uno de los que marcó fuertemente a la sociedad y a sus autoridades fue el terremoto ocurrido el 17 de agosto de 1999 con una magnitud de 7.4 en la escala de Richter con importantes daños en las ciudades de Izmit, Turquía y zonas próximas. Los daños causados por el terremoto se estimaron en 13.000 millones de dólares, más de 15.000 personas murieron, 25.000 resultaron heridas y más de 600.000 quedaron sin viviendas. El terremoto produjo un déficit en las cuentas del estado nacional en aproximadamente 3.000 millones de dólares del presupuesto correspondiente al periodo 1999-2000, lo que equivale alrededor del 1.50 % del Producto Bruto Interno del país (disponible en <http://www.proteccioncivil-andalucia.org>).

El 9 de diciembre de 1998 se produce un devastador terremoto en Armenia con una magnitud de 6.9 en la escala de Richter. En la región afectada vivían 700.000 personas de las cuales murieron 80.000, es decir más de un 10 % de la población. Los informes oficiales no precisaron las pérdidas económicas que el terremoto representó para el país (disponible en <http://www.crid.or.cr/crid/MiniKitEarthquakes>).

El 26 de Diciembre de 2003 la ciudad de Bam, en Irán, fue sacudida por un importante terremoto que alcanzó una magnitud de 6.6 en la escala Richter. Los informes oficiales de la ONU indicaron un número superior a 20.000 muertos, 50.000 heridos y 70.000 personas perdieron sus viviendas (más del 60 % de los edificios fueron destruidos o tuvieron daños importantes). Solamente la Federación Internacional de la Cruz Roja y de Media Luna Roja



realizaron una convocatoria para recaudar la cantidad de 12 millones de dólares con el objeto de proporcionar asistencia a los damnificados (disponible en <http://www.elmundo.es>).

De la misma manera que Turquía, la India también ha sido afectada en distintas ocasiones por terremotos importantes. Por ejemplo, más de 19.000 personas murieron en el distrito de Kangra al nordeste de la cadena montañosa del Himalaya en ocasión de un terremoto ocurrido en abril de 1905, más de 30.000 personas murieron en Maharashtra y Andhra Pradesh en oportunidad de otro terremoto en septiembre de 1993. A dicha lista puede agregarse los 1.500 muertos en oportunidad del terremoto de Assam en el año 1950 y de 1.600 muertos en el terremoto de Uttarkashi y Uttar Pradesh en ocasión de un terremoto ocurrido en año 1991. (disponible en <http://khatati.igp.gob.pe/cns/reportes>).

El 26 de enero de 2001 el estado de Gujarat en la India es afectada por un terremoto de magnitud 8.1 en la escala de Richter (Fig. 2.9). Según informes oficiales las pérdidas económicas fueron de 2.100 millones de dólares, sin embargo entes privados estimaron que los daños económicos serían mucho mayores debido a que sólo la pérdida de producción industrial ascendió a más de 400 millones de dólares. Las autoridades de la India debieron solicitar al Banco Mundial y al Banco Asiático de Desarrollo créditos la suma de aproximadamente 1.500 millones de dólares para la reconstrucción y rehabilitación de Gujarat (disponible en <http://www.tierramerica.net>).



*Fig. 2.9. Efectos del terremoto de Gujarat, India, 2001 (Fuente: <http://khatati.igp.gob.pe/cns/reportes>)*

En la India ocurrieron además dos grandes terremotos que también marcaron fuertemente a la sociedad. El terremoto de Uttar Pradesh ocurrido el 29 de marzo de 1999, alcanzó una magnitud Richter de 6.8 ( $M_w = 6.44$ ,  $M_b = 6.4$ ,  $M_s = 6.6$  y  $M_L = 6.8$ ), produjo 85 muertos, 1.600 heridos y aproximadamente 170 construcciones destruidas. El otro terremoto ocurrió el

23 de septiembre de 1993 en la región de Maharashtra, acusó una magnitud  $M_w$  de 6.2 y causó la muerte de 12.000 á 30.000 personas, no confirmadas en forma oficial, mientras que las pérdidas económicas de ambos terremotos no fueron informadas oficialmente. (disponible en <http://asc-india.org>).

Es importante hacer notar, sólo analizando el caso de la India, el número relevante de víctimas humanas y de pérdidas económicas que implica para un determinado país la ocurrencia de un terremoto. Por lo tanto y a la luz de las cifras expuestas hasta aquí se pone de manifiesto la urgente necesidad que nuestra ingeniería discuta fuertemente una nueva filosofía del diseño sismorresistente.

El 8 de octubre de 2005 se produce en Pakistán un terremoto con importantes consecuencias para dicho país (Fig. 2.10). La magnitud fue evaluada en 7.6 en la escala de Richter y con sólo una profundidad de 10 Km. produjo cerca de 30.000 muertos y 43.000 heridos en Pakistán, 800 muertos en la India y 4 en Afganistán, más de 2.5 millones de personas quedaron sin viviendas (disponible en <http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2005>). A la fecha no existen datos oficiales sobre las pérdidas económicas que representa para el país la ocurrencia del terremoto, sin embargo fueron necesarios aportes económicos importantes para controlar la situación, por ejemplo UNICEF destinó la suma de 20 millones de dólares para atender los daños y las emergencias en las escuelas, mientras que otros países (Gran Bretaña, Holanda, Irlanda y China) comprometieron la suma de aproximadamente 10 millones de dólares.



*Fig. 2.10. Efectos del terremoto de Gujarat, India, 2001 (Fuente: <http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2005>).*

China por su lado ha sido otro país fuertemente afectado por los terremotos. Uno de los más importantes lo constituye el terremoto de Tangshan ocurrido el 27 de Julio de 1976 conformado por dos eventos sísmicos consecutivos. El terremoto principal alcanzó una

magnitud de 7.5 en la escala de Richter mientras que su réplica alcanzó el valor de 5.0 á 5.5 en la misma escala. Según cifras oficiales la cantidad de muertos ascendió a 240.000 mientras que otras estimaciones, también oficiales, indicaron la cantidad de 650.000 muertos en oportunidad de los dos terremotos. El 93 % de la viviendas familiares colapsaron, el 78% de los edificios industriales fueron totalmente destruidos, el 80% de las estaciones de bombeo de agua fueron seriamente dañadas. Las pérdidas económicas de ambos terremotos no fueron informadas oficialmente. (disponible en <http://neic.usgs.gov/neis>).

Taiwán ha sido afectada por importantes terremotos, dos de los cuales tuvieron un gran impacto en la sociedad. El primero, ocurrido el 16 de julio 1935, alcanzó una magnitud de 7.4 en la escala de Richter y produjo la muerte de 2.700 personas. El más reciente se produjo el 17 de agosto de 1999 con una magnitud de 7.6 en la misma escala. Informes oficiales, no definitivos, indicaron la muerte de 1.700 personas, 4.000 heridos y más de 80.000 familias sin viviendas. Las pérdidas económicas fueron oficialmente estimadas en aproximadamente 3.2 millones de dólares.

Una de las zonas sísmicas más activas del mundo se encuentra en Japón. La historia de éste país muestra una extensa lista de terremotos que han afectado la región, sin embargo es posible sintetizarlos en tres. El terremoto de Great Kanto ocurrido el 01 de septiembre de 1923 alcanzó una magnitud de 8.3 en la escala de Richter y produjo la muerte de 140.000 personas. El terremoto de Fukui ocurrido el 28 de Junio de 1948, alcanzó una magnitud de 7.2 en la escala de Richter y produjo la muerte de 5.400 personas y por último el terremoto de Hyogo-Ken Nanbu, conocido como terremoto de Kobe, el cual, junto con el terremoto de Northridge, California, Estado Unidos, marcan un importante quiebre en la ingeniería sísmica mundial. Los dos terremotos ocurren en países altamente desarrollados y los efectos producidos en ellos ponen en evidencia que el problema sísmico no sólo se centra en los países subdesarrollados, con muchos menos recursos económicos, sino también en países desarrollados y con importantes recursos asignados a la ingeniería sísmica.

El presente punto se finaliza con una breve reseña sobre los efectos de éstos dos terremotos (Northridge, 1994 y Kobe, 1995), precisamente porque los mismos representan un quiebre en la ingeniería sísmica en cuanto al comportamiento de sistemas no tradicionales en el diseño de estructuras emplazadas en zona sísmica.

Por ejemplo, con anterioridad al terremoto de Kobe de enero de 1995, Japón contaba con aproximadamente 100 edificios con sistemas de aislamiento de base. El comportamiento de dichos edificios, frente a terremoto severos, fue satisfactorio, aspecto que incrementó notablemente el uso de los sistemas de aislamiento. En el año 2000 existían más de 600 edificios diseñados con dichos sistemas (Clark P., Aiken I., et al, 1999).

El terremoto de Hyogo-Ken Nanbu es reconocido como uno de los desastres naturales más costosos de la historia moderna (Fig. 2.11). Las pérdidas se produjeron en tan sólo 20 segundos, la duración de la parte intensa del terremoto. El mismo se caracteriza por un desprendimiento importante de energía en un lapso de tiempo muy reducido. Esta característica es atribuible a terremotos asociadas a falla superficiales, con una importante probabilidad de que ocurra en la región de Mendoza. Las características de los mismos se desarrollarán en el capítulo 3 de la tesis y la respuesta de los sistemas de aislamiento sísmico, objeto del presente trabajo, será evaluada con acelerogramas que posean dichas características.

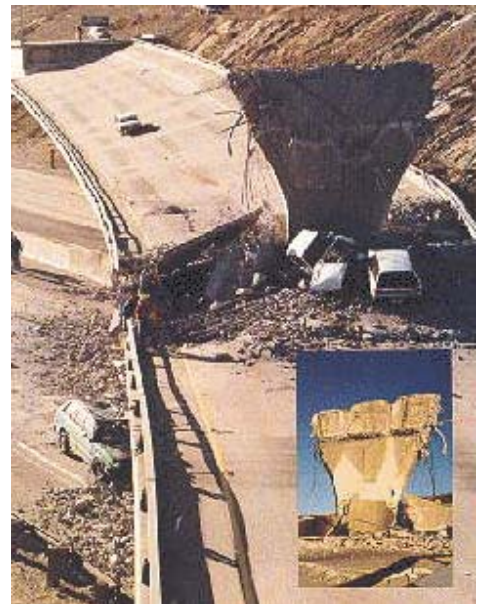
El terremoto citado se produce en una zona densamente poblada e industrializada, Kobe, Osaka con una población de 10 millones de habitantes. Los daños fueron importantes, más de 10.000 construcciones fueron destruidas, cerca de 300.000 personas quedaron sin viviendas, 5.500 personas murieron y 26.000 resultaron heridas. Según informes oficiales las pérdidas económicas ascendieron entre 150 á 200 mil millones de dólares (disponible en <http://www.zephyrus.demon.co.uk/geography/resources/earth/kobe.html>).



*Fig. 2.11. Efectos del terremoto de Hyogo-ken Nanbu, Kobe, Japón, 1995 (Fuente: <http://khatati.igp.gob.pe/cns/reportes>) .*



El terremoto ocurrido el 17 de enero de 1994 en Northridge, California, Estados Unidos de Norteamérica (Fig. 2.12) merece un capítulo aparte, sin embargo es oportuno sintetizar y destacar algunos aspectos de interés. El terremoto tuvo una magnitud  $M_w = 6.7$ , una duración de tan sólo 15 segundos (parámetro muy parecido al terremoto de Hyogo-ken Nanbu), ocasionó la muerte de 51 personas y arrojó una cantidad de 9.000 heridos. Los daños materiales fueron estimados en 25.000 viviendas de residencias particulares inhabitables (22.000 personas quedaron sin hogar), se perdieron 9 hospitales (lo que equivale a más de 2.500 camas perdidas), 7.000 edificios fuertemente dañados, no colapsaron pero se caracterizaron por ser irrecuperables, 22.000 edificios dañados y con una fuerte inversión para ser recuperados, 9 puentes colapsaron y 11 viaductos debieron cerrarse hasta su reparación. Las pérdidas económicas directas fueron de 44 mil millones de dólares, superando ampliamente a los 15 mil millones de dólares del terremoto de San Fernando de 1971. (disponible en <http://pasadena.wr.usgs.gov>) (<http://www.dis-inc.com/northrid.htm>).



*Fig. 2.12. Efectos del terremoto de Northridge, California, Estados Unidos, 1994 (Fuente: <http://khatati.igp.gob.pe/cns/reportes>).*

Los sistemas de disipación de energía y aislamiento sísmico, son hoy utilizados en edificios, puentes, viaductos y otras aplicaciones similares (Fig. 2.13). En Estados Unidos de Norteamérica, existen aproximadamente 575.000 puentes de los cuales aproximadamente el 60% fueron construidos con anterioridad a 1970 con muy pocas o ninguna consideración de diseño sísmico. Históricamente los puentes han sido estructuras muy vulnerables ante la ocurrencia de terremotos. Por ejemplo en el terremoto de San Fernando (California, Estados

Unidos, 1971) se dañaron 60 puentes pertenecientes al sistema estatal de autopistas, cuya reparación le costó al estado aproximadamente 100 millones de dólares. El terremoto ocurrido en octubre de 1989 de Loma Prieta, California, produjo daño en más de 80 puentes y su colapso causó la muerte de 40 personas. Los daños económicos de dicho terremoto fue de 1.8 mil millones de dólares de los cuales 300 millones se gastaron en la reparación de los puentes (disponible en <http://www.tfhr.gov/pubrds/summer94.htm>).



*Fig. 2.13. Sistema de Aislamiento Sísmico utilizado en el Puente de Marga – Marga II, Chile. (Noviembre de 2001. Fuente: Vulco s.a).*

### **2.2.2 Terremotos destructivos ocurridos en Argentina**

En la Argentina se cuentan con antecedentes históricos de terremotos ocurridos en el país prácticamente desde el siglo XVI hasta la fecha, sin embargo no se disponen de datos oficiales sobre los daños económicos que los mismos han ocasionado (Ver. Anexo A, Tabla A.IV).

El primer terremoto con antecedentes históricos ocurrió el 13 de septiembre de 1692 con foco superficial (30 Km.) y una magnitud de 7 en la escala de Richter. Destruyó en ese entonces la pequeña población de Talavera del Esteco en la provincia de Salta, produjo importantes daños en la ciudad de Salta y ocasionó un número no precisado de víctimas aunque los antecedentes indican que fueron numerosas (disponible en <http://www.inpres.gov.ar/seismology/historic/hist.panel.htm>).

Si bien la sismicidad regional y local se trata en profundidad en el capítulo 3 de la tesis, es oportuno, a los fines del presente capítulo, citar que la ciudad de Mendoza presenta su primer antecedente histórico con el terremoto del 22 de mayo de 1792. Su magnitud fue estimada en 7 grados, fue también de foco superficial (menor a los 30 Km.) y ocasionó daños en muchas construcciones con numerosas víctimas.

El 20 de marzo de 1861 se produce en Mendoza el terremoto más destructivo de la historia argentina, el mismo ocasionó el colapso de casi toda la ciudad de Mendoza y dejó aproximadamente unos 6.000 muertos sobre una población total de 18.000 habitantes.

El 27 de octubre de 1894 se produce el terremoto de mayor magnitud de todos los ocurridos en la Argentina. Su epicentro se ubica en el noroeste de la provincia de San Juan, su magnitud fue estimada en el grado 8 de la escala de Richter, produjo daños en las provincias vecinas y hasta los 500 Km. de la zona epicentral. El 15 de enero de 1944 se produce el terremoto que destruyó la ciudad de San Juan, su magnitud fue calculada en 7.4 de la escala de Richter, su foco fue superficial, menor a los 30 Km. y causó aproximadamente 10.000 muertos sobre una población de 90.000 habitantes. (Fig. 2.14.)



*Fig. 2.14. Efectos del terremoto de San Juan, Argentina, 1944 (Fuente: <http://www.inpres.gov.ar/seismology/historic.htm>).*

El terremoto más importante del sur del país se produce el 17 de diciembre de 1949, su magnitud fue de 7.8 en la escala de Richter, distancia focal menor a los 30 Km. y su epicentro se ubicó al oeste de la isla de Tierra del Fuego. Afectó no solamente a las poblaciones de la isla sino también a ciudades ubicadas más al norte, entre ellas Río Gallegos.

Otro de los terremotos importantes del país es el ocurrido el 23 de noviembre de 1977 en la ciudad de Caucete, provincia de San Juan. La magnitud del mismo fue de 7.4 en la escala de Richter, de foco muy superficial, apenas 17 Km. El terremoto ocasionó la muerte de 65 personas.

El 26 de enero de 1985 se produce el terremoto de Mendoza con una magnitud de 5.9 en la escala de Richter y una profundidad de foco de apenas 12 Km. El terremoto tuvo todas las

características de los de tipo impulsivo y falla superficial o cercana. El hecho de que haya sido muy superficial ocasionó importantes daños en la zona conocida como Gran Mendoza, el número de heridos fue importante, aunque solamente murieron dos personas. Un número importantes de familias quedaron sin viviendas (disponible en <http://www.inpres.gov.ar/seismology/historic/hist.panel.htm>).

## 2.3 Resumen

Entre los diversos desastres naturales ocurridos en el mundo entre 1900 y 1976 (terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, inundaciones, ciclones tropicales, tornados y deslizamientos de tierra), los terremotos son los que ocasionaron el mayor número de víctimas mortales, más de 2.66 millones; en segundo lugar, se ubican las inundaciones con 1.29 millones y el tercer puesto lo ocupan los ciclones con 0.43 millones de muertos (Crozier, M. J, 1986).

En el período citado los terremotos dejaron a casi 30 millones de personas sin viviendas (Galíndez E. et al, 2004). Otros estudios (Shah, 1983) indican que para el periodo 1947 a 1980 aproximadamente 180 terremotos, incluyendo siete tsunamis, produjeron la muerte de 358.980 personas en Asia, 38.837 en Sudamérica, 30.613 en América Central y el Caribe, 18.232 en África, 7.750 en Europa y 137 en Estados Unidos de Norteamérica.

*“El tipo de riesgo caracterizado por una baja probabilidad de ocurrencia y grandes consecuencias, presenta un difícil problema de política pública que es cómo sustentar el interés común y la intervención y cómo atraer recursos del gobierno suficientes para programas de disminución del riesgo sísmico. Los terremotos son una categoría especial de riesgo, en la cual, la mayoría de las pérdidas humanas se deben a fallas estructurales hechas por el hombre: edificios, presas, vías de comunicación, líneas de alta tensión, etc.- Consecuentemente, en principio, con recursos suficientes para la investigación, desarrollo, educación, seguido por la inversión necesaria para la reducción del riesgo, el peligro que representan los terremotos son un riesgo que está dentro de nuestra capacidad de respuesta. Podemos reducir su peligrosidad tanto como queramos. Podemos aprender dónde no construir y cómo construir de modo que las fallas de las estructuras no ocurran”* (Discurso dado en la Octava Conferencia Mundial sobre Ingeniería Sísmica en San Francisco en 1984 por el Dr. Frank Press,



reconocido especialista en las Ciencias de la Tierra) (Galíndez E. et al, 2004).

Del texto anterior se deduce que el problema sísmico es complejo independientemente donde ocurran los terremotos, sin embargo es posible reducir el riesgo sísmico conjugando adecuadamente políticas públicas, investigación, desarrollo, educación e inversión. De estas últimas se rescata, al menos al ámbito que le compete a la presente tesis, la investigación y en particular el de técnicas no tradicionales como nuevas herramientas para plasmar una nueva filosofía del diseño sismorresistente.

Otros estudios relacionados con las pérdidas de vidas humanas y económicas a nivel mundial (Giuliano, 2005) indican que los países desarrollados (PD) después del terremoto de San Fernando de 1971 ocurrido en California, Estados Unidos de Norteamérica, implementaron políticas que permitieron controlar el colapso de las construcciones y como consecuencia de ello reducir las pérdidas económicas y de vidas humanas. Según el estudio el objetivo propuesto fue logrado en los PD. Sin embargo y a pesar de los grandes desarrollos que ha tenido la sismología y la ingeniería sísmica, dicho efecto, no ha sido posible conseguirlo en los países en vías de desarrollo (PVD) (Fig. 2.15, 2.16 y 2.17).

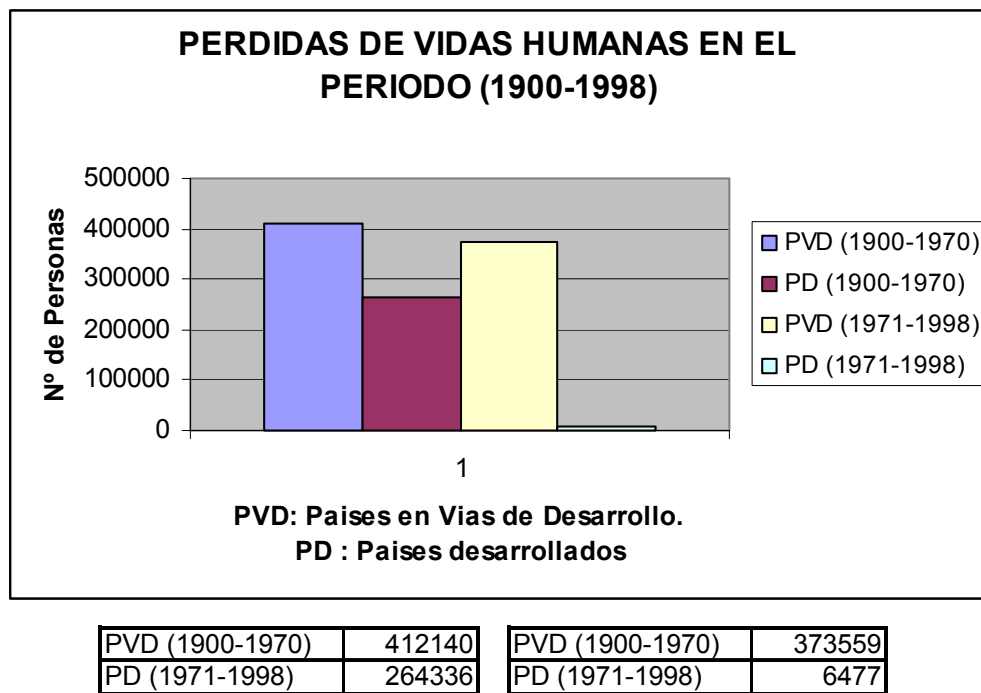


Fig. 2.15. Pérdidas de vidas humanas en el periodo 1900-1998

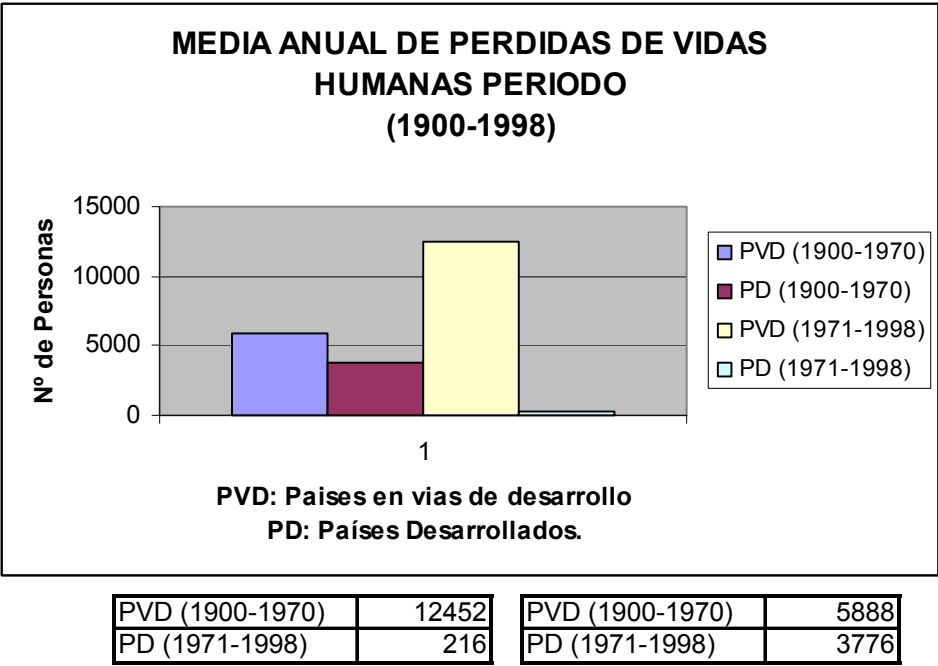


Fig. 2.16. Media anual de pérdidas de vidas humanas en el periodo 1900-1998

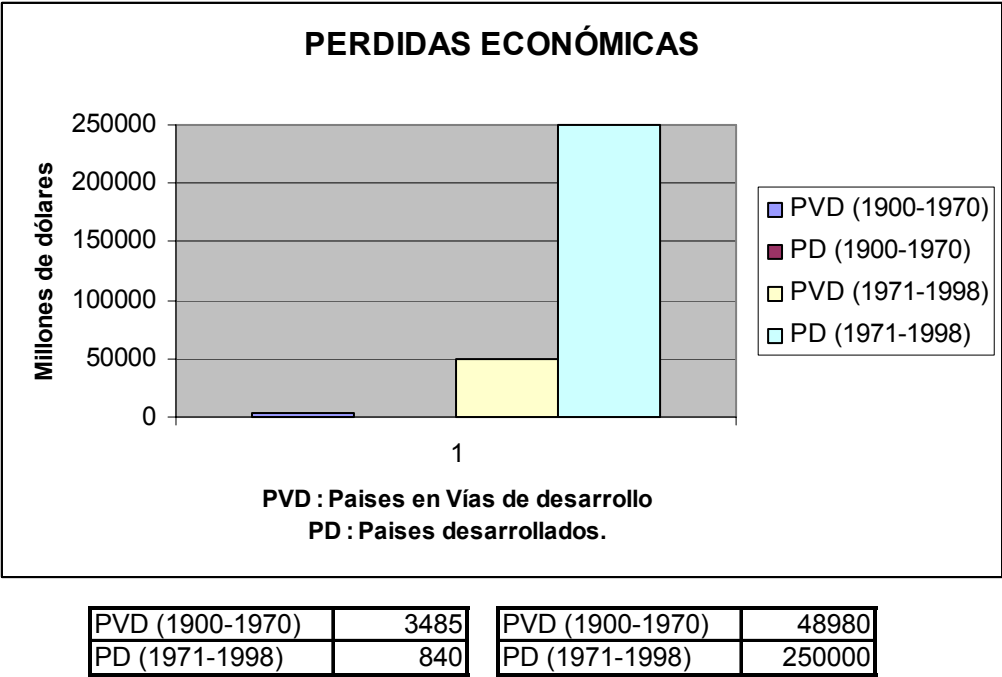
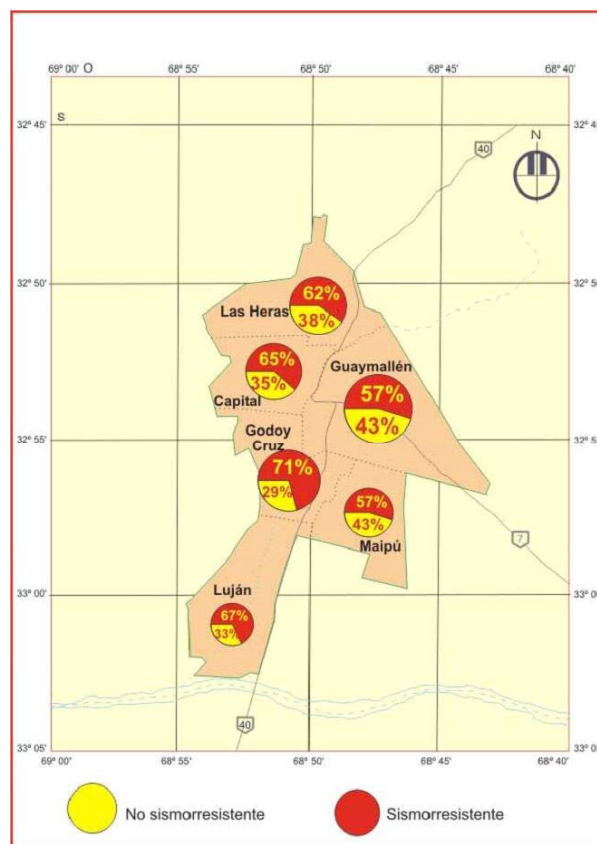


Fig. 2.17. Pérdidas económicas en millones de dólares en el periodo 1900-1998

Si bien las realidades entre los dos tipos de países son distintas, las causas pueden ser comunes para ambos, por ejemplo los PD han logrado aplicar y hacer cumplir sus códigos de construcciones de una manera más estricta que los países en vías de desarrollo y además han implementado, inclusive a nivel de reglamentos, nuevas técnicas, no tradicionales tales como el

aislamiento sísmico de base y la disipación de energía, aún no muy difundida en los países en vías de desarrollo. Los PVD aún no han logrado dichos resultados, por lo tanto tienen una importante deuda con la sociedad y un considerable esfuerzo a realizar en dicho sentido.

La provincia de Mendoza y en particular el Gran Mendoza no escapa a las realidades de otras regiones. Si bien posee códigos de construcciones sismorresistentes, aún existen muchas construcciones que no cumplen con ninguna prescripción sísmica fundamentalmente por su antigüedad y tipo de materiales utilizados (Fig. 2.18) (Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza, 1989).



*Fig. 2.18. Construcciones sismorresistentes y no sismorresistentes del Gran Mendoza (Fuente: Microzonificación sísmica del Gran Mendoza)*

El mismo estudio ha realizado una evaluación del daño probable a esperarse en las construcciones del Gran Mendoza. Para ello se ha definido los siguientes niveles de daños:

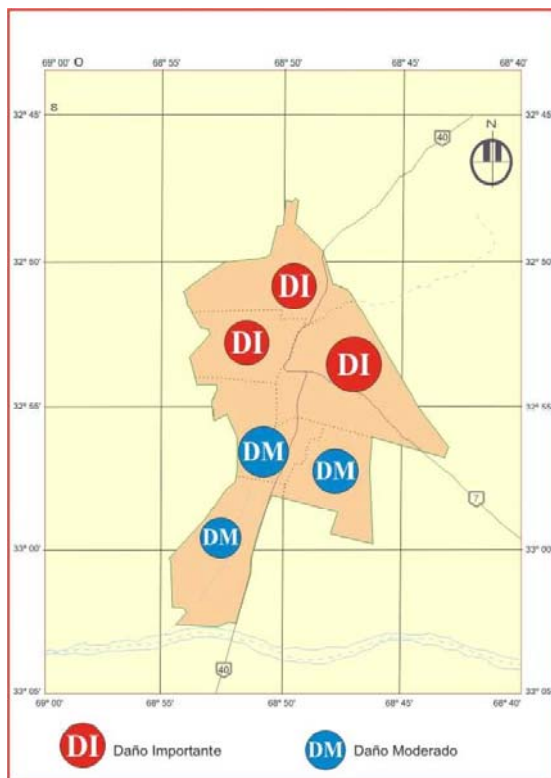
**DB:** Daños bajos. Del 0 al 5% de las construcciones sufrirán colapso parcial o total.

**DM:** Daños moderados. Del 5 al 25% de las construcciones sufrirán colapso parcial o total.

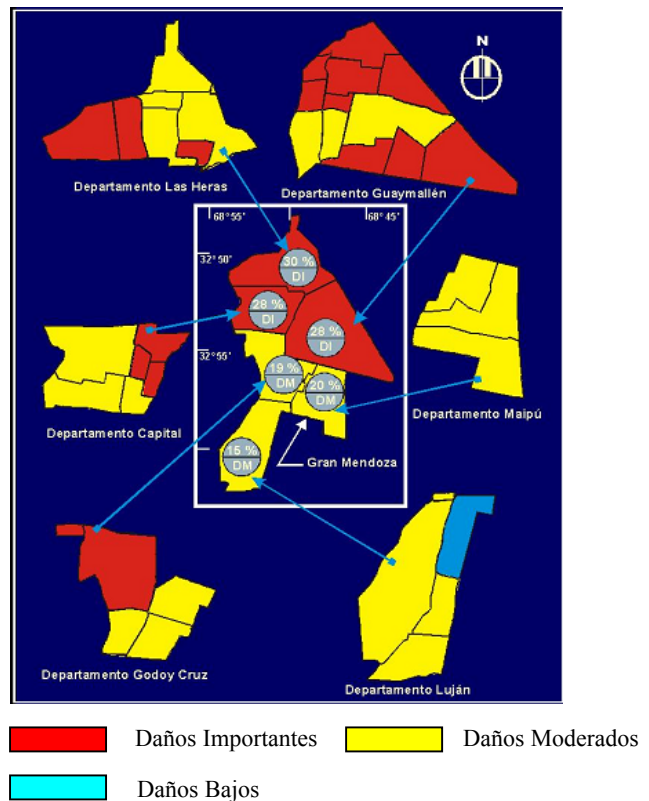
**DI :** Daños importantes. Del 25 al 50% de las construcciones sufrirán colapso parcial o total.

**DMA:** Daños muy altos. Del 75 al 100% de las construcciones sufrirán colapso parcial o total.

En la Fig. 2.19 puede observarse la distribución de los niveles de daños en el Gran Mendoza y en la Fig. 2.20 se detalla el nivel de daño esperado en los distintos Departamentos que conforman dicha área.



*Fig. 2.19: Distribución de los niveles del daño en el Gran Mendoza  
(Fuente: Microzonificación sísmica del Gran Mendoza)*



*Fig. 2.20: Distribución de los niveles del daño por Departamentos que conforman el Gran Mendoza  
(Fuente: Microzonificación sísmica del Gran Mendoza)*

En resumen, el impacto de los desastres naturales en términos de pérdidas de vidas humanas y económicas implican cifras significativas y ha crecido en los últimos años. La sociedad en general se ha tornado más vulnerable a los desastres naturales, sobre todo debido al crecimiento de la población en áreas densamente pobladas. Los sectores más afectados por los dichos desastres naturales y particularmente por los terremotos son los grupos más pobres y

socialmente marginados en países en desarrollo, los cuales son los menos equipados para hacerles frente.

La respuesta al desastre sola no es suficiente, ya que reditúa sólo resultados temporales a un muy alto costo. Se ha seguido dicha metodología, limitada por cierto, por demasiado tiempo sin que se hayan logrado, en muchos casos, buenos resultados, por lo tanto es necesario una revisión crítica a las filosofías del diseño sismorresistente utilizadas hasta la fecha. Los objetivos del presente trabajo son aportar algunas de las herramientas necesarias para producir algún cambio o para reforzar dichas filosofías y con ello minimizar los efectos de los terremotos sobre las personas y las construcciones.