

# Capítulo 11

## 11.1 Conclusiones generales

El desarrollo del trabajo ha permitido destacar los beneficios de los sistemas de aislamiento sísmico aplicado a las obras de ingeniería y emplazadas en zonas de elevado riesgo sísmico. El trabajo de tesis ha desarrollado un sistema de aislamiento sísmico poco conocido y utilizado a nivel mundial. Su diseño se realizó a través de una predicción teórica y los resultados se verificaron a través de registros sísmicos medidos en el mismo edificio.

Los resultados del trabajo dan una respuesta a uno de los objetivos principales de la tesis, es decir, la implementación a través de una experiencia piloto, de un sistema innovador de aislamiento sísmico de base para un edificio diseñado de acuerdo a los mecanismos generadores de terremoto y a las características del tipo de suelo de la zona de emplazamiento. Si bien los resultados que todavía se esperan en un futuro pueden ser numerosos, el trabajo de tesis desarrollado, en esta etapa, puede considerarse completo. El proyecto ha considerado el diseño del sistema de aislamiento y del propio edificio, la predicción teórica del conjunto aislado, la construcción del edificio y sus obras complementarias, el montaje del sistema de aislamiento y la instrumentación sísmica completa del edificio aislado y del de base fija. Por lo tanto el proyecto puede considerarse físicamente terminado. En un futuro y a partir de la información que se logre de los datos que arroje la instrumentación sísmica será posible conocer otros aspectos de las respuestas del sistema de aislamiento sísmico implementado.

El desarrollo del trabajo ha verificado la hipótesis relacionada con la disposición de elementos de baja capacidad a fuerzas horizontales, entre la estructura y la fundación. La técnica permite reducir los valores de aceleraciones y fuerzas inerciales en la superestructura a expensas de un aumento de los desplazamientos laterales.

Los resultados obtenidos en el trabajo han verificado que un mayor valor de amortiguamiento del sistema de aislamiento, resulta una alternativa posible y económica para controlar los grandes desplazamientos que causan los terremotos superficiales o de falla cercana como consecuencia de la presencia de largos pulsos de aceleración, velocidad y desplazamiento.

El trabajo contiene importantes conclusiones que permiten definir lineamientos generales para el proyecto de edificios con aislamiento sísmico de base, sobre todo para estructuras que estén expuestas a terremotos destructivos y especialmente a los asociados a falla cercana. La tesis ha permitido desarrollar una transferencia tecnológica de un sistema innovativo de aislamiento de base sobre el cual no existen antecedentes en la región.

Los análisis realizados y los resultados obtenidos permiten definir métodos de diseño para predecir la respuesta de estructuras con sistemas de aislamiento de base de tal manera de controlar el daño y el colapso estructural. Cuidar dichos aspectos permite generar construcciones más seguras y aportar nuevas técnicas para reducir el riesgo sísmico de la mismas. La información contenida en el trabajo puede ser considerada para la redacción de futuros códigos relacionados con la técnica del aislamiento sísmico, tema que no se encuentra incorporado en los códigos del país.

## **11.2 Conclusiones específicas**

### **11.2.1. Conclusiones del análisis teórico**

El capítulo 8 contiene conclusiones sobre los resultados de la predicción teórica relacionada con las aceleraciones, desplazamientos, distorsiones de piso, corte a nivel de base y de sistema de aislamiento, esfuerzos en algunos elementos estructurales de la superestructura, relaciones de fuerza vs. deformación y relaciones de desplazamientos horizontales vs. verticales de los mismos. Se expresan conclusiones relacionadas con desplazamientos máximos en cada una de las direcciones estudiadas y la influencia del amortiguamiento del sistema de aislamiento (GCS), sobre los valores de las respuestas fundamentalmente en términos de aceleración y de desplazamiento.

Otros datos indican resultados de la interacción suelo – estructura para el sistema (GCS), datos que permiten definir el grado de influencia de la deformación del suelo de fundación en la respuesta del edificio aislado. La totalidad de las conclusiones expuestas representa la predicción de los sistemas de aislamiento estudiados a través del modelo teórico. Posteriormente, las mismas han sido verificadas, en el capítulo 10, mediante la validación de dicho modelo.

### **11.2.2. Conclusiones sobre los registros sísmicos disponibles**

Los resultados expuestos en el capítulo 11 y Anexo E indican que el instrumental sísmico instalado en los edificio de la residencia de estudiantes de la FRM – UTN se encuentran funcionando en forma adecuada. El instrumental entrega una importante información, datos que permiten conocer las respuestas reales de los dos edificios instrumentados.

Los registros sísmicos obtenidos del instrumental instalado en el edificio con aislamiento sísmico indican valores de aceleración mucho menores que los registrados, para el mismo nivel, en el edificio de fundación tradicional. Este resultado pone de manifiesto, una vez más, la conveniencia del empleo de sistemas de aislamiento sísmico en zonas con antecedentes de peligro sísmico. Las aceleraciones registradas en el techo del edificio de base fija indican un fuerte incremento de las mismas comparadas con las que se obtienen en campo libre o a nivel del sistema de aislamiento.

Los efectos torsionales y rotacionales del conjunto aislado pueden considerarse despreciables. Las respuestas en términos de rotación del edificio con aislamiento sísmico no resulta relevante frente a los desplazamientos horizontales y verticales. Las respuestas del modelo teórico presentan una concordancia aceptable con los valores de los registros sísmicos, tanto en términos de aceleración como también de desplazamientos para los dos casos estudiados (edificio con aislamiento sísmico, GCS, y torre de base tradicional).

Los resultados encontrados durante el proceso de validación del modelo teórico, indican que el tipo de análisis y la modelación realizada resultan adecuada a los fines de la predicción teórica. El programa utilizado (SAP2000) para realizar análisis lineales y no lineales en el espacio del tiempo predice en forma adecuada la respuesta de modelos que incluyan aislamiento sísmico, modelos de base fija u otros donde se incorpore la deformación del terreno de fundación.

Los resultados obtenidos de la validación del modelo teórico indican que se ha representado en forma aceptable las leyes constitutivas de los sistemas de aislamientos estudiados, no sólo en rango lineal sino también en rango no lineal. Otros resultados también indican una aceptable representación de los parámetros que caracterizan al terreno de fundación en el estudio de la influencia del suelo en la respuesta del conjunto aislado.

### **11.2.3. Conclusiones relacionadas con la propuesta de la tesis**

Las teorías y reglamentaciones disponibles a nivel mundial, utilizadas para el diseño del sistema de aislamiento en la presente tesis son adecuadas, sin embargo muchas de ellas, especialmente los reglamentos, no tienen incorporados prescripciones que tengan en cuenta los efectos de falla cercana en las respuestas del conjunto aislado. La Argentina no cuenta con una reglamentación específica del tema, tampoco existen a nivel región o Provincia de Mendoza. Dentro del ámbito citado no existen antecedentes sobre construcciones civiles a las cuales se les haya implementado sistemas de aislamiento sísmico (a excepción del presentado en esta tesis). Por lo tanto es importante la elaboración de un reglamento nacional o al menos regional que contemple las nuevas técnicas del diseño sismorresistentes (aislamiento de base, disipación de energía) con el objeto de salvar el importante vacío normativo que existe en el país sobre dicho tema.

Los sistemas de aislamiento sísmico proveen una adecuada solución a la escasa respuesta que ha dado la ingeniería sísmica al colapso estructural, no estructural y de contenidos, a las pérdidas económicas y de vidas humanas. Los resultados indican que la implementación de dispositivos de aislamiento sísmico, reduce los valores de aceleración y fuerzas inerciales en la superestructura a expensas de aumentar los desplazamientos. Diseñar sistemas de aislamiento sísmico con altos valores de amortiguamiento permite controlar los desplazamientos del conjunto aislado, producto de la presencia de pulsos largos de aceleración, velocidad y desplazamientos en los movimientos sísmicos de campo cercano.

En el Capítulo 2, se concluye que los terremotos se caracterizan por la cantidad de pérdidas económicas y número de muertos y heridos, lo cual indica la importancia de desarrollar nuevos dispositivos para controlar el daño y el colapso mediante una nueva concepción del diseño sismorresistente. Los países en vías de desarrollo (entre ellos Argentina), se ven altamente impactados por la ocurrencia de un terremoto destructivo, por lo tanto diseñar estructuras que tengan la función de atender la emergencia en zonas de alto riesgo sísmico con técnicas tradicionales, no representa para el país una óptima inversión.

Durante los últimos veinticinco años, sólo los terremotos han causado más de un millón de muertes en el mundo. El impacto de los desastres naturales en términos de pérdidas de vidas humanas y económicas implica cifras importantes y sigue creciendo. 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. La respuesta al desastre sola no es suficiente ya que reedita exclusivamente en resultados temporales a un muy alto costo. Dicha metodología ha sido utilizada durante muchos años sin lograr buenos resultados, por lo tanto es necesario una revisión crítica de las filosofías del diseño sismorresistente utilizadas hasta la fecha.

En el Capítulo 3, se concluye que la zona del Gran Mendoza y por lo tanto la del emplazamiento del edificio, presenta un importante peligro sísmico. La mayor contribución al mismo proviene de la sismicidad de las fuentes superficiales o de corteza y fundamentalmente de la falla Cerro La Cal – calle Perú, emplazada próxima al edificio con aislamiento sísmico (menos de 5 Km.). De acuerdo con los antecedentes, la zona del Gran Mendoza ha sido afectada por terremotos cuyos focos han sido superficiales y como tales pueden ser más destructivos que otros con focos intermedios o lejanos.

El desarrollo del Capítulo 4 ha permitido concluir sobre el resultado de diversos trabajos de investigación relacionados con los terremotos de falla cercana, en particular orientadas a evaluar las características de distintos tipos de terremotos. Dichos trabajos encontraron importantes diferencias entre registros asociados a falla cercana de aquellos que provenían de fuentes más alejadas, las citadas diferencias, inclusive, implican una respuesta estructural distinta según sea la distancia a la fuente.

Debido al emplazamiento de los edificios (próximos a la Falla Cerro La Cal – Calle Perú), es necesario considerar los efectos cercanos a la fuente, fundamentalmente porque el movimiento del suelo estará fuertemente influenciado por el mecanismo de ruptura de falla y la dirección relativa de propagación respecto del sitio. Los terremotos de falla cercana implican mayores esfuerzos de corte en la base y distorsiones de piso y por ende, requieren un aumento de la demanda de ductilidad en estructuras convencionales, situación que muchas veces no es posible conseguir con los diseños sismorresistentes tradicionales. Sobre dicho aspecto es precisamente donde los sistemas de aislamiento sísmico adquieren vital importancia porque con ellos la incursión en rango no lineal no implican riesgos para la superestructura y los contenidos.

El mismo Capítulo 4 presenta una serie de observaciones sobre las características de los terremotos de falla cercana en función de la forma de los espectros de aceleración, velocidad y desplazamientos y su variación en el tiempo.

En el Capítulo 5, se concluye que el concepto de aislamiento sísmico es ampliamente aceptado en regiones sísmicas para la protección de construcciones civiles (EEUU, Japón, Italia, Nueva Zelanda, China, Chile, Armenia, México, Turquía, Rusia, etc). Existen antecedentes de edificios con aislamiento sísmico emplazados próximos a fallas con adecuados comportamientos del sistema, frente a la ocurrencia de terremotos destructivos. Se ha detectado un importante crecimiento en la utilización de la técnica a nivel mundial, no sólo en los países desarrollados sino también en muchos otros en vías de desarrollo a excepción de Argentina. Este aspecto pone de manifiesto un importante retraso del país en la implementación de éstas nuevas técnicas a pesar de que la misma evidencia una continua y constante evolución, tanto desde su desarrollo tecnológico, como de aplicaciones prácticas.

El mismo Capítulo 5 concluye sobre la existencia de muchos países que tienen implementados códigos para la regulación de las construcciones con sistemas de aislamiento sísmico a excepción de en Argentina. Los códigos de uso frecuente en la Provincia de Mendoza y en el país no incluyen, dentro de sus contenidos, sistemas activos o pasivos de disipación de energía, otro aspecto que evidencia un retraso del país comparado con otros, inclusive de la región. Por lo tanto es necesario e importante una inmediata revisión de los códigos actuales de tal manera de contar con un marco normativo que permitan transferir dichas técnicas a la práctica habitual de la ingeniería. Otros temas tratados en el citado capítulo 5 indican la importancia que tiene el valor del amortiguamiento, no solo en la respuesta del sistema aislado, sino también al momento de tomar decisiones sobre el tipo de aislamiento a utilizar como protección sísmica.

En el Capítulo 6, se concluye que el diseño de los elementos estructurales y no estructurales que conforman la superestructura del edificio aislado, pueden realizarse con los conocimientos del análisis y de la dinámica estructural, sin embargo, el diseño y construcción de la estructura ubicada por encima del sistema de aislamiento requiere detalles y precisiones de uso poco frecuente durante la etapa de construcción de la obra civil (posicionamiento de platinas de fijación, obras complementarias, instalaciones, etc). Este aspecto no solamente debe tener en cuenta la propia ejecución de los trabajos, sino también, disponer de mano de obra especializada y habituada a realizar trabajos con precisión. El mismo capítulo 6 pone de manifiesto, una vez más, el importante vacío normativo que existe sobre el tema y del cual ya se ha comentado ampliamente en estas conclusiones.

En el Capítulo 7, se concluye entre otros aspectos, (ver Capítulo 8), que el método estático desarrollado para el sistema NZ conduce a valores de corte en la superestructura muy inferiores a los exigidos por los códigos que reglamentan las acciones para edificios con fundaciones tradicionales. Los resultados del análisis teórico, demuestran la conveniencia del uso de los sistemas de aislamiento, sin embargo y debido a las características de los terremotos utilizados en el análisis, no es posible establecer un patrón de respuesta para los sistemas analizados, ello posiblemente se deba a las características particulares de los terremotos asociados a falla cercana, entre ellos, periodo del pulso y relaciones entre el periodo del pulso y del sistema aislado.

Otros resultados encontrados en el Capítulo 7 indican que la presencia de pulsos largos de aceleración y velocidad tienen una importante incidencia en el desplazamiento del sistema de aislamiento. Este aspecto es necesario tenerlo en cuenta al momento de la elección del sistema de aislamiento y del diseño de los parámetros dinámicos de dicho sistema. Los resultados indican que las componentes horizontales, asociada a los sismos de falla cercana, poseen entre sí, una correlación atípica. Este aspecto conduce al hecho que los desplazamientos máximos del sistema de aislamiento están controlados por el mayor valor de desplazamientos del suelo y no por su composición vectorial.

Los resultados teóricos encontrados en el capítulo 7 ponen de manifiesto la conveniencia del uso de sistemas de aislamiento en construcciones emplazadas en regiones de alto riesgo sísmico, sin embargo, ellos indican que las respuestas del conjunto aislado se encuentran fuertemente influenciadas por las características particulares de cada terremoto.

En el Capítulo 9 se concluye sobre la necesidad de contar con mano de obra especializada para realizar los trabajos de obra civil con mayor precisión. El personal afectado a las obras tradicionales no está habituado a trabajar con exactitud. A ello debe sumársele, la escasa tecnología que actualmente incorporan las empresas constructoras a la construcción de edificios. Tecnológicamente no es lo mismo construir edificios tradicionales o edificios con aislamiento sísmico, al menos en ciertas etapas del proceso constructivo.

La construcción e implementación del sistema de aislamiento impuso el desafío de diseñar y desacoplar el edificio de cualquier obra exterior que interactuase con el mismo y que hiciese al sistema ineficiente. Este aspecto toma relevancia cuando se piensa que el sistema

implementado (GCS), no solamente tiene liberado los desplazamientos horizontales, sino también los verticales. Esta particularidad lo diferencia de otros sistemas ampliamente difundidos (elastoméricos o friccionales).

Otras conclusiones del desarrollo del capítulo 9 indican que el edificio con aislamiento sísmico requiere de obras complementarias no exigidas por los edificios tradicionales, de tal manera que permitan el libre movimiento (horizontal y vertical) del edificio ante la ocurrencia de sismos. Dichas obras anexas deben contemplar, entre otros, los espacios necesarios para la inspección y mantenimiento del sistema de aislamiento.

Del desarrollo del citado capítulo, también se concluye que fue posible el diseño y la implementación de una tecnología especialmente utilizada para levantar el edificio y montar el sistema de aislamiento. La técnica fue altamente eficaz para el objetivo fijado. Por último, el proyecto del edificio con aislamiento sísmico cuenta con una adecuada red de instrumental sísmico de doce canales para monitorear las respuestas del edificio aislado y del de base fija. Dicho instrumental permite contar, a la fecha, con información sumamente importante para el proyecto.

### **11.3 Recomendaciones para futuros estudios**

Las respuestas para desplazamientos, velocidad y aceleración del sistema (GCS) no tienen el mismo comportamiento para todos los terremotos seleccionados para el estudio. Posiblemente la causa de ello se deba a las características propias de cada terremoto, por lo tanto futuras investigaciones sobre el tema podrán orientarse en determinar la influencia del contenido de frecuencias de los terremotos en las respuesta del edificio aislado. Otros trabajos de investigación (Skinner et al., 1993) insinúan que la respuesta de los contenidos del edificio aislado depende del rango de frecuencia en relación con la frecuencia fundamental del edificio. Por lo tanto, la incidencia del contenido de frecuencia de los terremotos del lugar de emplazamiento podría tener una incidencia sobre los resultados encontrados.

Trabajos de investigación realizados sobre estructuras con disipadores de energía y sometidas a terremotos de falla cercana (Xu Z., et al., 2007) encontraron que las respuestas se encontraban influenciadas por el valor del periodo del pulso y la relación entre el periodo del



pulso y el periodo del edificio. Por otro lado dichas respuestas eran diferentes si los efectos de falla cercana se representaban con una señal sísmica tipo pulso o tipo seno. Por lo tanto futuras investigaciones sobre el tema pueden orientarse a determinar la influencia de las características del pulso en relación a dos variables, el periodo del conjunto aislado y el valor de amortiguamiento del sistema de aislamiento.

Otros resultados del Capítulo 7 son que las respuestas de los sistemas de aislamiento estudiados son muy dispares y se observa que dependen de cada terremoto. Futuros estudios pueden centrarse en encontrar ciertos parámetros de los registros sísmicos de los cuales dependen las respuestas del conjunto aislado.

Se cuenta con numerosa información obtenida de los ensayos a escala real realizada en los edificios de la residencia de estudiantes. El procesamiento de dicha información puede conducir a entender otros aspectos de la técnica implementada o mejorar la comprensión de las respuestas frente a la ocurrencia de un terremoto.

## **11.4 Reflexiones finales**

Los resultados expuesto en la tesis son el producto de un largo y arduo camino que se inicia a mediados del año 2002 con el diseño estructural de todos los edificios que conforman la residencia de estudiantes, incluidos la torre aislada y el sistema de aislamiento sísmico. Los trabajos continuaron con la elaboración de la totalidad de la documentación técnica, la tramitación de los permisos municipales, el llamado a licitación de las obras, la construcción y el control de los trabajos. El tema inherente a la tesis se encontraba inserto en un contexto mucho más amplio, la totalidad del proyecto era el objetivo principal desde el punto de vista institucional y como tal era indivisible.

Hoy se puede decir que todo el complejo se encuentra totalmente terminado y funcionando gracias al trabajo de un talentoso grupo humano. Sin embargo existieron muchas actividades que no han sido detalladas en el presente trabajo, muchas de ellas porque no son objetivo de la tesis, entre ellos, el edificio con aislamiento sísmico, otras por no extenderme en tareas complementarias, que si bien parecen intrascendentes, resultaban fundamentales para los objetivos de la propia tesis.

El trabajo de tesis se encontró inserto y contenido dentro de un Centro con amplia experiencia en la investigación aplicada, sin embargo, el presente proyecto se llevó adelante con la colaboración de muy pocos investigadores a través de trabajos intermitentes debido a escasos recursos humanos disponibles para investigación, escasos recursos económicos y a una excesiva carga de trabajo en las pocas personas que conforman dicho Centro. Dicha situación fue la causa para que el tesista debiera necesariamente actuar en todas y cada una de las instancias del proyecto, es decir, desde el mínimo detalle a las conclusiones finales del trabajo. Precisamente muchos de esos “*mínimos detalles*” son los que no han sido tratados, sin embargo todo aquel que hace investigación, bien sabe que son tan importantes como los resultados mismos, más aún, estos últimos dependen de los primeros aunque insuman tiempos muy valiosos.

Si bien el camino ha sido largo y arduo, debido a las causas expuestas, no por ello ha dejado de ser enriquecedor, tanto desde el punto de vista profesional, como personal. El trabajo de tesis ha permitido desarrollar un edificio con aislamiento sísmico que ha sido el primero y es único en el país, emplazado en una de las regiones sísmicas más importantes de la Argentina. El proyecto ha utilizado una técnica de aislamiento poco frecuente a nivel mundial y ha permitido avanzar en el conocimiento de su respuesta frente a terremotos destructivos. Se podrá discutir si el sistema utilizado es el más conveniente en relación a los sistemas tradicionales más frecuentes, esto para los objetivos de la tesis no es lo más relevante, lo que sí importa es que es diferente. El tema desarrollado ha permitido posicionar a la Facultad Regional Mendoza de la UTN como un organismo universitario pionero y de referencia en el tema de aislamiento sísmico en la región y como tal cumple plenamente con los objetivos institucionales de educar, investigar y transferir conocimiento al medio social donde ella esta inserta.