

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

Uno de los objetivos principales de la introducción de tesis doctoral es explicitar las razones por la cual se ha elegido el tema. La respuesta no es una sola debido que se conjugaron una serie de hechos y circunstancias, algunas académicas y otras profesionales y personales que delinearon , en principio, en sus aspectos generales y luego particulares el tema desarrollado en la presente tesis.

Una de las reflexiones que fundamentaron los citados hechos y circunstancias es pensar en los importantes daños materiales y económicos y en muchos otros casos las lamentables pérdidas de vidas humanas que provoca la ocurrencia de un terremoto destructivo.

Ante un panorama tan desolador, como el que se puede ver en cualquier parte del mundo donde ocurren dichas catástrofes naturales, la pregunta sería *¿es posible reducir el riesgo?, ¿se podrá evitar las pérdidas materiales y económicas, y lo que es aún más importante la de vidas humanas?*. En las dos preguntas queda plasmado el desafío que se tiene por delante y fueron ellas las principales motivadoras para la elección del tema.

Una segunda reflexión merita expresar que en nuestro medio local es habitual que la construcción civil (fundamentalmente la relacionada con la edificación), ya sea en pequeña o gran escala, aún se ejecuta de la misma manera que la realizada por los primeros inmigrantes. Si bien los mismos aportaron una importante mano de obra al crecimiento del país, las técnicas constructivas han cambiado muy poco con relación a dicha época. Hoy, si bien en algunos casos se utiliza una mejor tecnología, se sigue manteniendo su concepción básica, es decir la de utilizar los mismos materiales que entonces y el mismo medio artesanal. Por lo tanto, la pregunta sería *¿en que aspectos de las técnicas constructivas hemos avanzado? ¿se han desarrollado nuevas tecnologías, nuevas técnicas o nuevas estrategias para mitigar los efectos destructivos de los terremotos?, ¿cómo ingenieros, universitarios o especialistas en ciertos temas, hemos aportado a la sociedad toda, algunas soluciones en tal sentido?*. Estos cuestionamiento resultan importantes para evidenciar la urgente necesidad que hoy tiene la sociedad de la cual formamos parte.

Es oportuno recordar que la primera universidad del mundo occidental <sup>(1)</sup> tuvo que dar una urgente respuesta a la sociedad sobre un problema no menor relacionado con la alimentación. Hoy desde un punto de vista optimista las necesidades han cambiado, sin embargo los desafíos siguen siendo los mismos.

En los últimos años la ingeniería sísmica a nivel mundial ha tenido que reconocer la limitación de sus métodos de diseño, fundamentalmente porque un número reducido de edificios, diseñados por ingenieros y en el cual se han utilizado reglamentos de diseño sísmico de última generación (redactados por ellos), han colapsado. Dicho colapso en muchos casos se ha evidenciado cuando las construcciones civiles se encuentran emplazadas próximas al epicentro (Saragoni, 2004).

No hace muchos años el colapso de las estructuras se consideraba un fenómeno casi exclusivo de los países subdesarrollados principalmente debido a las construcciones con adobe y mampostería. Sin embargo los terremotos de San Fernando (1971) y Northridge (1994) en Estados Unidos, o Kobe (1995) en Japón, por citar algunos ejemplos, pusieron en evidencia para los países desarrollados que los efectos de los terremotos sobre las construcciones y las personas no se trata solamente de un problema económico, sino del estado del conocimiento que posee la ingeniería para darle una adecuada respuesta a una necesidad que desde tiempos remotos plantea la sociedad.

Por lo tanto la presente tesis pretende avanzar en el conocimiento sobre el uso y la implementación de nuevas técnicas, relacionadas con los sistemas de aislamiento sísmico de base, para mitigar y controlar el daño material de las construcciones y sus contenidos atendiendo otro, más que importante objetivo, como es el de proteger las vidas humanas de sus ocupantes.

---

El origen de la Universidad de Bologna se atribuye al año 1088, fecha fijada por una comisión histórica precedida por *Giosué Carducci*. La institución que hoy se llama Universidad comienza a conformarse en Bologna a fines del siglo XI cuando contenidos de gramática, retórica y lógica comienzan a aplicarse al Derecho. Los primeros estudiosos de los cuales se tiene documentación son "*Pepone*" e "*Irnerio*", éste último definido "*lucerna iuris*". Con la consultoría de cuatro doctores alumnos de Irnerio, Federico I promulga en 1158 el "*Constitutio Habita*" con el cual la Universidad se declara, por ley, un lugar en el cual la investigación se desarrolla independientemente de cualquier otro poder.

## 1.2 Objetivos de la tesis

En las dos últimas décadas, la ingeniería ha tenido un avance tecnológico importante. Sin embargo, en nuestro medio y dentro de la especialidad de ingeniería civil, no ha sido posible aún dar una adecuada respuesta a los efectos que producen los terremotos destructivos. Los mismos ocasionan un retraso socio-económico importante en la región donde ellos ocurren acompañados de cuantiosas pérdidas económicas y, en muchos otros casos, de vidas humanas.

La ciudad de Mendoza junto con San Juan representan las zonas de mayor riesgo sísmico del país y constituyen el núcleo socio-económico más importante y más poblado del oeste argentino, por lo tanto es de esperarse, importantes daños y pérdidas de vidas ante la ocurrencia de un terremoto destructivo.

En los últimos años se han implementado, principalmente en los países desarrollados, nuevas técnicas para controlar los efectos de los terremotos. El aislamiento sísmico de base (Kelly, 1990) y los disipadores de energía (Bosso et al, 2000) representan actualmente las técnicas innovadoras más recientes en relación a los sistemas tradicionales, para controlar y reducir la vulnerabilidad de las construcciones emplazadas en zonas de elevado riesgo sísmico. Si bien sus correspondientes marcos teóricos a nivel mundial se encuentran adecuadamente fundamentados, en el país, y en particular en la Provincia de Mendoza, no existen antecedentes sobre los mencionados sistemas, ya sea desde un punto de vista de aplicación práctica, como de estudios teóricos de la respuesta dinámica de construcciones sujetas a terremotos destructivos asociados a falla cercana o focos superficiales.

Como hipótesis se sostiene que el hecho de introducir elementos de baja capacidad a fuerzas horizontales, como son los sistemas de aislamiento de base, entre la estructura y la fundación, se logra aumentar el periodo del conjunto aislado en relación al mismo edificio pero con fundación tradicional. Ello reduce los valores de aceleración y de fuerzas inerciales en la superestructura, a expensas de aumentar los desplazamientos laterales.

La Provincia de Mendoza posee antecedentes sobre la ocurrencia de terremotos con importantes pulsos de velocidad característicos de los sismos de falla cercana. Con el objeto de controlar los desplazamiento debidos a la presencia de dichos pulsos, se plantea como

segunda hipótesis que la adición de amortiguamiento es una alternativa posible y económica para evitar sistemas de aislamiento de dimensiones importantes. Por ejemplo, para controlar valores altos de desplazamientos del conjunto aislado las dimensiones de aisladores elastoméricos resultan significativas, situación que se refleja en las obras complementarias y en los espacios necesarios para desarrollar el proyecto.

Uno de los objetivos principales de la tesis fue la implementación, a través de una experiencia piloto, de un sistema innovador de aislamiento sísmico de base para un edificio de tres niveles (cuya construcción también forma parte de la presente tesis), diseñado de acuerdo a los mecanismos generadores de terremotos, a las características del tipo de suelo y a los s  ismos que se esperan en la zona.

Un segundo objetivo es definir lineamientos generales para el proyecto de edificios con aislamiento sísmico de base, sobre todo para estructuras que est  n expuestas a terremotos destructivos y especialmente a los asociados a falla cercana. La propuesta del trabajo de tesis es desarrollar una transferencia tecnológica de un sistema innovativo de aislamiento de base sobre el cual no existen antecedentes en la Región.

Sobre la base de los antecedentes anteriores, se busca definir lineamientos para el proyecto de edificios con sistemas de aislamiento de base para estructuras que est  n expuestas a terremotos importantes. Estos lineamientos deben contemplar los efectos particulares que presenta la región (características de los s  ismos, tipos de suelo y particularidades constructivas).

Por último, se busca definir métodos de diseño que permitan predecir la respuesta de las estructuras con sistemas de aislamiento de base con el fin de controlar el daño y el colapso estructural de tal manera generar construcciones más seguras para la práctica de la ingeniería civil y de toda la sociedad.

### **1.3 Metodología**

Se realiza una recopilación y análisis de los trabajos relacionados con la temática de aislamiento sísmico de base para terremotos de falla cercana. En función de las características regionales de la zona y del tipo de s  ismo esperado en la región, se estudian los parámetros que definen el diseño del sistema instalado con el objeto de controlar el daño y el colapso

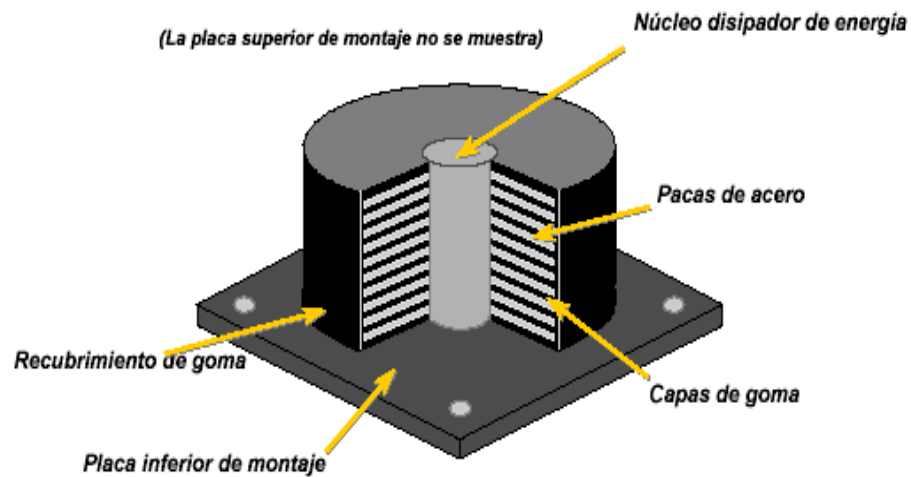
estructural. Se realiza un análisis de los antecedentes y además bibliográfico con el objeto de definir los datos necesarios para conformar una base sólida para el desarrollo de la tesis.

Se evalúan las características del fallamiento local y regional y se definen las características y parámetros dinámicos de los sismos de falla cercana, locales y el comportamiento de los suelos de la zona ante acciones dinámicas. Basados en estudios realizados sobre los aspectos sísmicos de la región se definen las características y parámetros dinámicos de los sismos de diseño del edificio y del sistema de aislamiento.

En una segunda instancia se procede a la revisión de las normas actuales existentes en el país y en el extranjero. Se establece una comparación entre las características de los terremotos de diseño utilizados en otras regiones con aquellos sismos que se esperan en la región de Mendoza.

Se utiliza un software específico de la dinámica estructural para modelar el conjunto (edificio + sistema de aislamiento) en 3D (SAP 2000), se realizan análisis lineales y no lineales de la estructura en el dominio del tiempo con el objeto de evaluar analíticamente el comportamiento del conjunto aislado. Los resultados obtenidos se utilizan para el diseño del sistema de aislamiento. Se han realizados ensayos del edificio aislado y del edificio de base fija, sin embargo los mismos no se presentan en ésta instancia de la tesis (Ver capítulo 6). Con el objeto de comparar las respuestas estructurales con las obtenidas del análisis teórico, se realiza una comparativa entre los resultados teóricos obtenidos con los valores que surgen de los registros sísmicos. Se establecen conclusiones y experiencias para definir ciertos patrones que permitan resolver proyectos futuros.

En la etapa de diseño se evalúa, la respuesta estructural del edificio utilizando dos tipos posibles de sistemas de aislamiento de base: aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (Fig. 1.1) y aisladores de resortes tipo muelle (Gerb<sup>  </sup>) instalados en paralelo con amortiguadores visco-elásticos de eje vertical (Visco<sup>  </sup>) (Fig. 1.2). Las respuestas estructurales se comparan con las obtenidas para otro edificio de las mismas características arquitectónicas y estructurales pero bajo la condición de base fija (fundación tradicional). Se obtienen conclusiones sobre las particularidades de cada sistema analizado y se destaca la conveniencia del aislamiento de base frente a edificios con fundaciones tradicionales.



*Fig.1.1: Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo*



*Fig. 1.2: Aisladores de resortes con amortiguadores visco-elásticos*

## 1.4 Estructura de la Tesis

La tesis se divide en once capítulos. En el Capítulo 2 se presentan los efectos económicos y socio culturales que han tenido los grandes terremotos sobre las obras de ingenier  , las instituciones y personas en general y tiene como objeto dejar plasmada la urgente necesidad de producir un cambio en el diseño de las estructuras emplazadas en zona sísmica.

Es conocido que el oeste argentino y en especial la provincia de Mendoza y San Juan se encuentran ubicadas en las zonas de mayor riesgo sísmico del país. El mismo responde, entre otros parámetros, a condiciones geológicas locales y regionales, antecedentes históricos de terremotos y teoría de la geotectónica. Por otro lado, los terremotos asociados a fallas cercanas, conducen a respuestas estructurales muy distintas comparados con los de focos

lejanos. Además, existen estudios (Heaton, T. H., Hall J. F., et al, 1995 y Malhotra, K., 1999) que han puesto en duda la eficacia de los sistemas de aislamiento de base cuando los mismos se encuentran emplazadas en proximidad de la falla. Los antecedentes sobre la sismicidad local y regional se discuten en el Capítulo 3.

En el Capítulo 4 se presenta una descripción de las principales características de los terremotos de falla cercana y sus diferencias más relevantes con los de origen subductivo. El objetivo del capítulo es conocer los parámetros que caracterizan a tales tipos de terremotos de tal manera de definir acelerogramas con dichas características. La presencia de las características de falla cercana en los acelerogramas, permiten evaluar las respuestas del edificio con aislamiento de base y verificar conclusiones obtenidas en los trabajos de Heaton et al, 1995 y Malhotra, 1999.

En el Capítulo 5 se presenta una recopilación de antecedentes sobre las principales estrategias que hoy se utilizan a nivel mundial para reducir la vulnerabilidad de la obras de ingeniería de tal manera de controlar y evitar el daño de las mismas. Los sistemas de aislamiento sísmico de base constituye una de las posibles estrategias a utilizar en una nueva concepción del diseño sismorresistente. En dicho capítulo se resumen los aspectos más relevantes del estado actual del conocimiento y del arte de los sistemas de aislamiento sísmico.

Tal cual se mencion   en los puntos anteriores, la tesis tiene como objeto el diseño y la implementación de un sistema posible de aislamiento de base para uno de los edificios de la Residencia Universitaria de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional. Las características del edificio, el diseño sismorresistente del mismo y las particularidades que requiere la implementación del sistema de aislamiento se discuten en el Capítulo 6.

En la etapa de diseño, se estudi   en forma analítica la respuesta del edificio cuando se utilizan dos posibles sistemas de aislamiento (aisladores de goma de alto amortiguamiento con núcleo de plomo y aisladores de resortes helicoidales met  licos instalados en paralelo con amortiguadores viscoelásticos). El diseño y la respuesta estructural de ambos sistemas de aislamiento se presenta en el Capítulo 7.

En el Capitulo 8 se realiza una discusión preliminar de los resultados teóricos obtenidos sobre todas las respuestas investigadas. Se comparan las respuestas obtenidas entre los dos sistemas de aislamiento estudiados con un mismo edificio pero de fundación tradicional.

Los primeros ocho capítulos se encuentran relacionados con la etapa de diseño, estudio teórico, fundamentación y evaluación de la respuesta estructural del conjunto aislado. Los siguientes capítulos se refieren fundamentalmente a las actividades realizadas en el terreno, por ejemplo en el capítulo 9 se describen los trabajos relacionados con la construcción del edificio, las obras civiles complementarias, el montaje del sistema de aislamiento y la instrumentación sísmica provista al proyecto.

El sistema de aislamiento sísmico, instalado en el edificio, no fue posible disponerlo con anterioridad al comienzo de los trabajos de construcción del mismo debido a diversos motivos, económicos, operativos, tiempo de fabricación, etc. Por lo tanto el sistema fue montado durante el proceso de construcción del edificio y para ello se utilizaron técnicas especiales para proceder a su instalación. El proceso y las técnicas utilizadas para lograr el objetivo citado se discuten en el mencionado capítulo 9. El trabajo además contempla la implementación de la instrumentación sísmica con el objeto de contar con registros de aceleración del edificio aislado, del de base tradicional y en campo libre. El objetivo de la misma es comparar, en el tiempo, los registros sísmicos obtenidos en las distintas estaciones. Las características del equipamiento, emplazamientos y trabajos de instalación se describen en el mismo capítulo 9.

Con el objeto de verificar el comportamiento del sistema de aislamiento instalado, comparar la respuesta del conjunto aislado con el edificio de fundación tradicional y realizar la validación del modelo teórico y del programa de computación utilizado, se comparan los resultados obtenidos de dicho modelo teórico con los realmente registrados por el instrumental instalado. Los resultados de dichas comparaciones se discuten en el capítulo 10. En el mismo capítulo se realiza una discusión preliminar de las respuestas estructurales obtenidas. Se efectúa una comparación con la predicción teórica, la validación del modelo y el software utilizado de tal manera de proponer, si fuese necesario, un ajuste del modelo teórico de acuerdo a los resultados obtenidos.



Los resultados y las conclusiones finales se discuten en el Capítulo 11. Por último la tesis incluye cinco anexos donde se consignan, tablas, planos generales del edificio (arquitectura y estructura), detalles constructivos relacionados con los trabajos de aislamiento de base, planos de escaleras que vinculan los edificios, acelerogramas, espectros y pseudoespectros de respuestas, registros sísmicos y todo otro dato relevante que aporta información a la tesis.

## 1.5 Resultados preliminares

Algunos resultados obtenidos del estudio y modelo teórico demuestran que:

- a. Los desplazamientos horizontales máximos del sistema resortes más amortiguadores visco-elásticos resultan ser, en promedio, un 34% de los que se obtienen con el sistema de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.
- b. Las aceleraciones impuestas a la superestructura por los terremotos utilizados para evaluar la respuesta de la estructura aislada, son más eficientemente filtradas por los aisladores elastoméricos que por los de resortes más amortiguadores visco-elásticos. Sin embargo, dicha situación resulta mucho más conveniente respecto a que si el edificio fuese de base fija.
- c. Para el edificio con fundaciones tradicionales, el incremento de aceleración entre la base y el último nivel resultan, en algunos casos, del 800%. Las reducciones promedios de dichas aceleraciones para el sistema de aisladores elastoméricos es de aproximadamente del 300 %, mientras que para el sistema de resortes y amortiguadores es del 50 %.
- d. Las fuerzas de corte y esfuerzos normales máximos, para un elemento columna del primer nivel del edificio, acusa reducciones promedios del 46% para ambos sistemas de aislamiento comparado con el edificio de base fija. Para el mismo elemento estructural, el sistema con aisladores elastoméricos reduce en promedio un 42% los momentos flectores máximos, mientras que el sistema de resortes y amortiguadores reduce, los mismos valores, un 49% comparado con el edificio de base fija.

- e. Por último y en relación a las reacciones de base horizontal, el sistema resortes más amortiguadores conduce a valores del 36% de las reacciones horizontales del edificio con base fija, mientras que para el sistema aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, dichos valores se reducen en un 15%. En la otra dirección, la vertical, el sistema de resortes y amortiguadores conduce a valores del 80% comparados con los resultados de base fija, mientras que los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo no reducen valores de reacciones verticales.

El resto de los resultados finales y otras conclusiones se discuten en los capítulos 8, 10 y 11 de la tesis.