

Capítulo 8

Discusión preliminar de los resultados teóricos

8.1. Introducción

En el capítulo anterior se ha realizado una predicción del modelo teórico, tanto para el edificio con fundación tradicional, como para los sistemas de aislamiento utilizados en la etapa de diseño (NZ) y en la etapa final de la construcción (GCS). Por lo tanto, se cuenta con una importante cantidad de datos (Ver capítulo 7 y anexo D) que permiten delinear algunas conclusiones preliminares sobre la respuestas de los sistemas de aislamiento y su relación con un mismo edificio de fundación tradicional. La instancia concluida del capítulo 7 permite, a continuación, trasladar a la faz práctica el diseño encontrado para el sistema de aislamiento implementado en la etapa final del proyecto (GCS).

En consecuencia el presente capítulo tiene como objeto establecer un espacio para la discusión preliminar de los resultados obtenidos sobre las respuestas teóricas dinámicas, para los terremotos seleccionados para el diseño de todos los modelos estudiados en el capítulo 7. Se discuten parámetros de respuestas relaciones con aceleraciones, desplazamientos, distorsiones de piso, cortes a nivel de base y de sistemas de aislamiento, esfuerzos en algunos elementos estructurales de la superestructura, relaciones de fuerza vs. deformación para los sistemas de aislamiento y la relación de desplazamientos horizontales vs. verticales de los mismos. Otros datos disponibles permiten discutir, para los sistemas de aislamiento, las relaciones entre desplazamientos máximos en cada una de las direcciones horizontales estudiadas y la influencia del amortiguamiento sobre los valores de la respuesta. Por último, se cuenta con resultados de la interacción suelo – estructura, para uno de los sistemas de aislamiento estudiados (GCS), de tal manera que es posible definir el grado de influencia de la deformación del terreno de fundación en la respuesta del edificio con aislamiento sísmico de base.

8.2. Conclusiones preliminares sobre los resultados teóricos dinámicos

En el presente punto se discuten los resultados obtenidos y descriptos en el capítulo 7 y en el anexo (D), de tal manera de sintetizar resultados precisos sobre las respuestas estructurales encontradas.

8.2.1. Desplazamientos

Como es lógico esperar los desplazamientos para el modelo de base fija son considerablemente menores que los obtenidos para los sistemas de aislamiento sísmico. Dicha respuesta está asociada a la mayor rigidez del edificio con fundación tradicional en relación a los modelos con aislamiento de base.

Los desplazamientos del sistema (NZ) se concentran a nivel del sistema de aislamiento y de allí permanecen prácticamente constantes a lo alto del edificio. Para algunos de los terremotos seleccionados para el análisis, se han observado asimetrías en los desplazamientos y tendencias a desarrollarse casi exclusivamente en una sola dirección.

Los desplazamientos del sistema GCS, dado su mayor amortiguamiento, presentan, para los mismos terremotos, desplazamientos menores que el sistema (NZ). También se concentran a nivel del sistema de aislamiento pero los mismos no se mantienen constantes con la altura del edificio debido a los modos pendulares. Como consecuencia de la relación de frecuencias horizontales y verticales del sistema (GCS) la respuesta se manifiesta con desplazamientos verticales y pendulares en reemplazo de los movimientos horizontales, respuesta casi exclusiva del sistema (NZ). Las asimetrías de los desplazamientos observadas para el anterior sistema no se evidencian para el (GCS). Dicha respuesta, podría estar asociada al mayor valor de amortiguamiento que presenta esta técnica de aislamiento.

8.2.2. Distorsiones de piso

Los desplazamientos de piso del edificio con fundación tradicional son bajos. Estos valores se son el resultado de la rigidez alta del edificio, por lo tanto, y como es de esperarse, las distorsiones de piso son también pequeñas.

El sistema (NZ) presenta valores de distorsiones de piso menores que el edificio con fundación tradicional, a pesar de que los desplazamientos a nivel del sistema de aislamiento

son mayores. El hecho de que la deformación se concentre a nivel del sistema de aislamiento y que a partir de ese nivel permanezca prácticamente constante con la altura del edificio, conduce a valores de distorsiones bajos y menores que el modelo de base fija.

En el sistema (GCS), las distorsiones de piso no pueden estimarse directamente a partir de los valores de desplazamientos laterales obtenidos del modelo de análisis porque los mismos se encuentran influenciados por los modos pendulares del conjunto aislado.

La estructura aislada se deforma como un bloque rígido y el modelo acusa un aumento de la deformación con la altura debido a un efecto de rotación, en la base del edificio, producida por el desplazamiento vertical del sistema de aislamiento. Por lo tanto, el efecto de distorsión de piso no se manifiesta físicamente como un desplazamiento relativo entre un nivel superior e inferior debido a una deformación de los elementos verticales. La deformación relativa, entre dos niveles consecutivos, se debe, no solamente al efecto comentado anteriormente, sino además, a una rotación del edificio a nivel del sistema de aislamiento que se manifiesta a través de una deformación lateral. En dicho movimiento el edificio oscila como un cuerpo rígido.

Por lo tanto y con el objeto de que las distorsiones de piso del edificio de base fija y del sistema (NZ) no sean comparadas, erróneamente, con las obtenidas para el sistema (GCS), los valores derivados para éste último sistema han sido definidos en el presente trabajo como *“desplazamientos relativos horizontales por rotación del sistema de aislamiento”*. Este cambio de designación tiene como objeto entender que la deformación del conjunto aislado del sistema (GCS), físicamente es distinto al del sistema (NZ) y al del edificio con fundación tradicional. En resumen para poder comparar los valores obtenidos para las tres situaciones analizadas fue necesario calcular las distorsiones descontando el movimiento de cuerpo rígido.

8.2.3. Aceleraciones

En el modelo de base fija se observan importantes incrementos de aceleraciones horizontales y verticales entre la cota de fundación y el techo del edificio.

En el sistema (NZ) se observan importantes reducciones de las aceleraciones horizontales entre la cota ubicada por debajo del sistema de aislamiento y el techo del edificio. Las

aceleraciones son eficientemente filtradas por el sistema y el mayor porcentaje de reducción se concentra a nivel de la aislación, a partir de allí los valores permanecen prácticamente constante con la altura del edificio. A pesar de los resultados encontrados y comentados, se detectaron, para algunos terremotos, incrementos de las aceleraciones horizontales a nivel del techo del edificio, comparadas con los valores a nivel de cota ubicada por debajo del sistema de aislamiento. Esto estaría indicando que la respuesta es función de las características del terremoto. Para todos los casos estudiados, el sistema (NZ) muestra moderados incrementos de aceleraciones verticales, entre la cota de terreno ubicada por debajo del sistema de aislamiento y el techo del edificio.

El sistema (GCS) conduce a valores de aceleraciones finales muy aleatorias. En algunos casos se observan moderadas e importantes reducciones de las aceleraciones horizontales, entre la cota ubicada por debajo del sistema de aislamiento y el techo del edificio, sin embargo, en otros casos se observan moderados aumentos de dichas aceleraciones. El resultado de dicha respuesta estaría indicando una vez más que los valores de aceleraciones dependen de las características del terremoto.

Sin embargo, y a pesar de los aumentos en los valores relativos de las aceleraciones, estas son menores que las del modelo de base fija, situación que indicaría que el sistema (GCS), a pesar del aumento de la aceleración en relación con el sistema (NZ), representa una situación mucho más favorable que el edificio con fundación tradicional. Es decir que, en términos de aceleración, el sistema (NZ) presenta un mejor comportamiento que el (GCS).

Para el mismo sistema (GCS), las aceleraciones verticales presentan importantes reducciones para algunos de los terremotos estudiados, mientras que en otros casos se observan aumentos moderados. Este aspecto confirmaría el hecho de que las respuestas en términos de aceleraciones, como así también en términos de desplazamientos, dependen de las características del terremoto.

8.2.4. Corte en la base del edificio y a nivel del sistema de aislamiento

Los sistemas de aislamiento sísmico, en general, reducen las fuerzas de corte en la base del edificio respecto al edificio de fundación tradicional. De los dos sistemas de aislamiento estudiados el (NZ) conduce a los menores valores, aspecto que se encuentra asociado a su menor valor de amortiguamiento comparado con el sistema (GCS).

8.2.5. Reacciones normales en la base del edificio y a nivel del sistema de aislamiento

Las respuestas en términos de reacciones normales indican que el sistema de aislamiento (NZ) en ningún caso presenta una reducción comparado con el modelo de fundación tradicional. El sistema (GCS), en general, presenta una reducción de dicha respuesta para todos los terremotos seleccionados para el diseño, salvo para un reducido número de casos. Esta respuesta está asociada al mayor valor de rigidez vertical que presente el sistema (NZ) comparado con las del (GCS).

En el sistema (NZ) las reacciones normales son transferidas casi totalmente a la fundación, situación que responde a un valor de rigidez vertical importante del sistema. En la respuesta de dicho sistema predominan los modos traslacionales y rotacionales, mientras que el grado de libertad vertical se encuentra restringido por el sistema de aislamiento. La presencia de esfuerzos de máxima magnitud son generados por la excitación de modos con frecuencias relativamente altas (provocadas por la señal sísmica vertical), la cual no puede ser filtrada eficientemente por el sistema (NZ). Por otro lado, en el sistema (GCS) predominan los modos pendulares y rotacionales, la presencia del primero deja liberado el grado de libertad vertical y ello conduce a menores valores de reacciones normales en relación con el sistema (NZ) y obviamente que la del modelo de base fija.

8.2.6. Solicitaciones en elementos de la superestructura

Si bien el número de elementos de la superestructura (por encima de los sistemas de aislamiento) estudiados han sido limitados, se considera que los mismos representan una muestra significativa de ellos. Las solicitaciones evaluadas fueron los esfuerzos de corte, momentos flectores y normales máximos.

Los dos sistemas de aislamiento reducen de manera aceptable el corte, sin embargo no controlan de manera eficiente los momentos flectores (no obstante ello puede ser una particularidad exclusiva de los terremotos de falla cercana). Con respecto al esfuerzo normal, el sistema (GCS) presenta mayores reducciones que el sistema (NZ), comparadas con el edificio de fundación tradicional. Los resultados del Capítulo 7 indican que las respuestas encontradas son aleatorias o dispersas, aspecto que indicaría, nuevamente, que la misma está asociada a las características del terremoto.

Quizás sea oportuno citar que la selección de los terremotos para evaluar la respuesta y realizar el diseño del sistema de aislamiento han sido por demás conservadoras. La mayoría de los terremotos de diseño presentan importantes picos de aceleración, velocidad y desplazamientos y muchos de ellos pueden ser considerados como extraordinarios y poco frecuentes para la zona de emplazamiento del edificio. De acuerdo a lo indicado anteriormente (Capítulo 4), los mismos pertenecen a un listado de terremotos que han producido el colapso de estructuras tradicionales en las zonas donde han ocurrido inclusive muchas de ellas construidas con códigos modernos.

8.2.7. Ciclos de fuerza – deformación de los sistemas de aislamiento

Las relaciones fuerza – deformación encontradas para el sistema (NZ) indican una no linealidad en la respuesta. La incursión en rango no lineal está dada por escasos ciclos, mientras que dicho efecto no se presenta cuando el terremoto tiene bajos valores de PGA, PGV y PGD. La presencia de pulsos largos en los terremotos utilizados como señal sísmica, implican valores de desplazamientos significativos a nivel del sistema de aislamiento, lo cual exige importantes dimensiones de aisladores del tipo (NZ).

Las relaciones fuerza – deformación encontradas para el sistema (GCS) indican una perfecta linealidad en la respuesta. Los resultados obtenidos indican que los valores de desplazamientos son menores que la del (NZ), situación que puede ser beneficiosa para el sistema (GCS) si se piensa en la obras civiles complementarias necesarias para la instalación de la técnica de aislamiento. Los menores desplazamientos horizontales del sistemas (GCS), con relación al (NZ) se deben al mayor valor de amortiguamiento del primer sistema de aislamiento.

8.2.8. Relaciones entre desplazamientos horizontales y verticales en los sistemas de aislamiento

Para el sistema (NZ) los desplazamiento máximos se alcanzan solamente en pocos ciclos y en la mayoría de los casos en un único ciclo. Esta respuesta está asociada al carácter impulsivo de los terremotos seleccionados para el diseño. Los valores de desplazamientos verticales son muy pequeños comparados con los horizontales, respuesta que está asociada al mayor valor de rigidez vertical del sistema (NZ).

Los desplazamientos horizontales máximos del sistema (GCS) son menores que las del (NZ), mientras que los desplazamientos verticales son mayores. Como en el caso anterior y dado el carácter impulsivo de los terremotos seleccionados para el diseño, los desplazamientos máximos son alcanzados en pocos ciclos y en la mayoría de los casos en un único ciclo. Dada la relación de rigidez horizontal y vertical del sistema (GCS), los desplazamientos verticales son mucho mayores que los del sistema (NZ). Dicha respuesta produce un efecto pendular del edificio lo que conduce a un aumento de los desplazamientos horizontales con la altura del mismo, por lo tanto las fuerzas y amplitudes horizontales se transforman en desplazamientos pendulares y verticales que reducen las fuerzas dinámicas en la estructura del edificio.

8.2.9. Relaciones entre desplazamientos y aceleraciones horizontales de los sistemas de aislamiento

Las respuestas en términos de desplazamientos vs. aceleraciones horizontales fueron evaluadas a nivel del techo del edificio. Para el sistema (NZ) los máximos valores también se alcanza en pocos ciclos. Esta respuesta está asociada al carácter impulsivo de los terremotos seleccionados para el análisis y al menor valor de amortiguamiento con relación al sistema (CGS).

La respuesta del sistema (GCS) presenta un comportamiento similar aunque con menores valores de desplazamientos horizontales y en algunos casos mayores valores de aceleraciones transversales. El mayor valor de amortiguamiento del sistema conduce, en general, a que las aceleraciones máximas se desarrollen en un entorno más restringido de desplazamientos. El área encerrada presenta una forma más alargada comparada con las respuestas observadas para el sistema (NZ).

8.2.10. Relaciones entre desplazamientos horizontales de los sistemas de aislamiento

Se ha evaluado la respuesta, de los dos sistemas de aislamiento, en términos de desplazamientos horizontales máximos junto al instante de tiempo en que ellos se producen. Los resultados indican que los desplazamientos máximos no se producen en el mismo instante de tiempo, salvo excepciones acotadas y que seguramente están relacionadas con las características propias del terremoto. Por lo tanto, frente a la presencia de terremotos de falla cercana, no es necesario estimar el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento como componente de los desplazamientos. Es decir que el desplazamiento del sistema de aislamiento no es la suma vectorial de los máximos desplazamientos en cada dirección, sino

que el valor máximo del desplazamiento quedaría controlado por el mayor de ellos. Este hecho estaría indicando que una de las componentes de terremotos asociadas a falla cercana (la normal a la falla) se destaca en relación con la otra componente (la paralela a la falla).

Las relaciones entre desplazamientos horizontales indican que el sistema (NZ) presenta mayores valores de desplazamientos horizontales que el sistema (GCS). Para ambos sistemas los valores máximos se alcanzan para pocos ciclos, a veces para uno sólo; esta respuesta está asociada al carácter impulsivo de los terremotos seleccionados para el diseño. Estas dos repuestas también se manifiestan en la evaluación de otros comportamientos del conjunto aislado.

Las relaciones de desplazamientos presentan variaciones, en general aplanadas, lo que indica que los desplazamientos máximos tienden a polarizarse en una sola dirección. En muchos casos se ha observado que las relaciones de desplazamientos horizontales son asimétricas, es decir, que el desplazamiento máximo se presenta a un solo lado de la posición cero. Esta respuesta se observa con mayor frecuencia en el sistema (NZ), situación que estaría asociada al menor valor de amortiguamiento que el mismo presenta.

8.2.11. Aceleración y desplazamiento en función del amortiguamiento para el sistema de aislamiento (GCS)

Debido a que el sistema (GCS) tiene posibilidad de variar el amortiguamiento viscoso, se ha evaluado la variación de las aceleraciones y desplazamientos en la superestructura cuando su valor varía dentro de un entorno acotado. Para valores bajos de amortiguamiento las aceleraciones presentan valores máximos. Cuando aumenta el valor del amortiguamiento la aceleración en la superestructura, primero decrece, luego pasa por un valor mínimo y por último vuelve a crecer. En otros casos el comportamiento observado es que las aceleraciones muestran una tendencia a disminuir manteniéndose prácticamente constantes a partir de un cierto valor de amortiguamiento respecto del crítico.

Para valores bajos de amortiguamiento, los desplazamientos presentan valores máximos, cuando se aumenta el valor del amortiguamiento los desplazamientos disminuyen. Del resultado de éstas dos respuestas es posible pensar que el valor del amortiguamiento a suministrarle al sistema de aislamiento está controlado por la aceleración que llega a la superestructura y no por el desplazamiento. Esta conclusión se basa en el hecho de que la

aceleración tiene tendencia a aumentar a partir de un cierto valor de amortiguamiento, valor que oscila entre un 20% y un 25%.

8.2.12. Influencia de la rigidez vertical en la respuesta del sistema de aislamiento (GCS)

La rigidez vertical del sistema (GCS) es baja comparada con la del sistema (NZ), lo cual conduce a que el conjunto aislado presente modos pendulares con polos inferiores y superiores. Un aumento de la rigidez vertical aleja el polo inferior convirtiéndolo en un modo de traslación horizontal, mientras que el polo superior tiende al centro de gravedad del conjunto aislado convirtiéndose en un modo rotacional sobre dicho centro.

En el capítulo 7 se han determinado las posiciones de los polos citados cuando la rigidez vertical y horizontal del sistema (GCS) varía dentro de un entorno acotado. En dicho análisis (Tabla 7.35) puede observarse precisamente que cuando la rigidez vertical del sistema aumenta, la distancia al polo inferior, medida desde el centro de gravedad del conjunto aislado, también aumenta. El mismo efecto se observa con los valores de las frecuencias de los modos pendulares.

La variación de la rigidez vertical no modifica significativamente la respuesta horizontal en el rango de rigideces estudiadas en el capítulo 7 (punto 7.4.3), ni tampoco los desplazamientos a nivel del sistema de aislamiento. Por otro lado, la rigidez vertical no conduce a modificación alguna en la tendencia general de encontrar menores desplazamientos y mayores aceleraciones para rigideces horizontales mayores.

Un aumento del amortiguamiento del sistema de aislamiento resulta beneficioso porque disminuye los desplazamientos y reduce a niveles moderados el nivel de esfuerzos en los elementos estructurales. También permite controlar posibles amplificaciones en la zona de frecuencias altas. La componente vertical de la acción sísmica es a menudo considerada poco importante, sin embargo, la excitación vertical puede jugar un rol preponderante en el análisis tensional y muy especialmente para emplazamientos cercanos a la falla. Esa escasa consideración probablemente se deba a que los esfuerzos en el edificio sin aislamiento y debidos a la excitación vertical, son verdaderamente despreciables frente a los de su par horizontal.

Para el caso de sólo excitación vertical, es obvio que los desplazamientos horizontales resultan despreciables. Para esta dirección de excitación existe una importante amplificación de los esfuerzos respecto de los generados en el edificio sin aislamiento, con un factor de magnitud varias veces la unidad, valor que depende de las características del terremoto. Cuando la rigidez vertical es alta, los esfuerzos son independientes de la rigidez horizontal; sin embargo, cuando la rigidez vertical es baja se expresa una dependencia con la rigidez horizontal por el acoplamiento generado por las asimetrías.

8.2.13. Interacción suelo estructura

Para evaluar la influencia de la deformación del suelo en la respuesta del edificio con aislamiento sísmico, al modelo con el sistema (GCS) (sistema implementado en la etapa final de proyecto), se le incluyó la influencia del terreno circundante de fundación (Capítulo 7, punto 7.4.4, tabla 7.38) de tal manera de contar con datos sobre la interacción suelo – estructura.

Se evaluó, entre otras características, el periodo elástico del estrato de terreno blando hasta la cota de -8.80 m., nivel a partir del cual comienza la grava. No se evaluó en el presente trabajo la profundidad a la cual se encuentra la roca por lo tanto, se estimó un valor inferior de periodo de terreno. Si dicho valor no aumentase en forma exagerada, como es de esperarse, es posible afirmar, en una primera instancia, que el mismo se encuentra próximo al del edificio con fundación tradicional y alejado de los dos sistemas de aislamiento estudiados.

Bajo este nuevo modelo se estudiaron las respuestas en términos de desplazamientos y aceleraciones y fueron comparadas con el modelo que no incluía la deformación del suelo. Se determinaron las diferencias de las citadas respuestas a nivel del sistema de aislamiento (por encima del mismo) (Capítulo 7, punto 7.4.4., tablas 7.39, 7.40) y es posible concluir que las diferencias encontradas son desde el punto de vista práctico pequeñas, aspecto que indica que la deformación del terreno de fundación, para el presente caso de estudio, no tiene una incidencia importante en la respuesta en términos de desplazamientos y aceleraciones. Sin embargo, se detectaron diferencias significativas para el nivel ubicado por debajo del sistema para algunos terremotos. Estos resultados pueden observarse en la Tabla 7.41.

8.2.14. Terremotos de diseño del sistema de aislamiento

Tal cual se citó en el capítulo 4, si bien no es objeto de la presente tesis el estudio de terremotos de falla cercana, es posible, de la observación de las figuras incluidas en el anexo (B), concluir sobre aspectos preliminares que caracterizan a dichos movimientos.

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 y tratados en el presente capítulo. Debido a las características particulares de este tipo de terremoto, existen diferencias entre el espectro real de velocidades y el pseudo espectro correspondiente. Dichas diferencias son más notorias en la medida que aumenta el amortiguamiento y en zona de periodos altos.

La diferencia entre el espectro y pseudo espectro de velocidad depende del período natural del sistema. Para períodos largos la pseudo velocidad es menor que la velocidad y la diferencia entre ambas se hace mayor en dichas zonas del espectro. Los sistemas de aislamiento de base proporcionan las mayores ventajas en zonas de periodos altos. En muchos casos la respuesta del sistema depende del pulso de velocidad, por lo tanto, al momento de diseñar el sistema de aislamiento, es necesario tener en cuenta la diferencia entre el espectro real y pseudo espectro de velocidades.

Para los terremotos de falla cercana, seleccionados para el análisis, se ha observado que no existen diferencias entre el espectro real y pseudo espectro de aceleraciones elásticas. Se manifiestan algunas diferencias cuando se aumenta el porcentaje de amortiguamiento respecto del crítico. La forma de los espectros de desplazamientos son dispares y dependen de las características del terremoto. Existen casos en los cuales 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 métodos más simples. Esta última conclusión adquiere aún mayor relevancia cuando las señales sísmicas se encuentran asociadas a terremotos de falla cercana.

8.3. Resumen

El presente capítulo tuvo como objetivo principal sintetizar de una manera compacta algunas de las conclusiones de la tesis, especialmente sobre los resultados teóricos obtenidos en el capítulo 7 y sobre algunas características de los espectros y pseudo espectros de los terremotos de diseño observadas en el capítulo 4. Se han recorrido las mismas respuestas estudiadas en el capítulo 7, pero desde un punto de vista de conclusiones. Las mismas son útiles para contar con un resumen compacto de dicho capítulo. Las conclusiones expresadas permiten, en esta instancia del trabajo, generar un espacio para discutir los resultados obtenidos, sobre todo, para el sistema de aislamiento utilizado en la etapa final del proyecto (GCS).

Las conclusiones expuestas, las cuales representan la predicción de los sistemas de aislamientos estudiados a través del modelo teórico, son verificadas mediante la validación de dicho modelo (Capítulo 10).